

**INSTITUT FÜR BAUSTOFFE,
MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG

Festigkeit und Verformung von schweißgeeigneten, wärmebehandelten Betonstählen im Bereich tiefer Temperaturen

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. P. Warnecke

Dipl.-Ing. J. Erdmann

Mai 1988

**Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des
Landes Niedersachsen**

PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Lehrstuhl für Baustoffkunde und StahlbetonbauTECHNISCHE UNIVERSITÄT
BRAUNSCHWEIG

3300 Braunschweig den

Festigkeit und Verformung von schweißgeeigneten,
wärmebehandelten Betonstählen im Bereich tiefer
Temperaturen

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

Dipl.-Ing. P. Warnecke

Dipl.-Ing. J. Erdmann

Mai 1988

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Diese Arbeit wurde mit Hilfe von Forschungsmitteln des
Landes Niedersachsen in dankenswerter Weise gefördert.

Erlaß vom 01.03.1983 - GZ: 1091 - BV 4e - 34/82

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung.....	Seite 4
2.	Das Tempcore-Verfahren.....	6
3.	Verwendung von Betonstählen im Tieftemperaturbereich.....	12
4.	Untersuchungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von Tempcore-Betonstählen im Tieftemperaturbereich.....	15
4.1	Untersuchungsprogramm.....	15
4.2	Untersuchungsmaterialien.....	15
4.3	Chemische Analyse der Untersuchungsmaterialien....	15
4.4	Gefügebeschreibung anhand metallographischer Schliffbilder.....	16
4.5	Gefügebeschreibung anhand von Härtmessungen.....	16
4.6	Dilatometrische Messungen.....	16
4.7	Quasistatische Zugversuche an ungekerbten Betonstahlproben.....	16
4.7.1	Prüfungsumfang.....	16
4.7.2	Probenvorbereitung.....	17
4.7.3	Versuchseinrichtung.....	18
4.7.4	Versuchsdurchführung.....	20
4.7.5	Versuchsauswertung.....	23
4.8	Rasterelektronenmikroskopische Bruchuntersuchungen.....	27
5.	Untersuchungsergebnisse.....	28
5.1	Ergebnisse der chemischen Analyse.....	28
5.2	Ergebnisse der Gefügeuntersuchung.....	28
5.3	Ergebnisse der Härtmessungen.....	30
5.4	Ergebnisse der dilatometrischen Messungen.....	33
5.5	Ergebnisse der Zugversuche.....	33
5.5.1	Maschinen-Diagramme.....	33
5.5.2	Verformungsverhalten.....	45
5.5.3	Festigkeitsverhalten.....	57

5.6	Ergebnisse der Bruchuntersuchungen.....	62
5.6.1	Fraktographische Untersuchung des Proben- materials A.....	62
5.6.2	Fraktographische Untersuchung des Proben- materials B.....	64
6.	Zusammenfassung.....	66
7.	Literaturverzeichnis.....	70
8.	Anlagen zu Abschnitt 4.....	4.1-4.3
	Anlagen zu Abschnitt 5.....	5.1-5.29

1. EINLEITUNG

Im Zuge einer energiewirtschaftlichen Neuorientierung, hervorgerufen durch das Wissen um einen begrenzten Erdölvorrat sowie durch die krisenabhängigen Preisschwankungen des Rohöls und der damit verbundenen Suche nach alternativen Trägern von Primärenergie gewinnt das verflüssigte Erdgas, LNG genannt, zunehmende Bedeutung. Die Verflüssigung von Erdgas geschieht aus Gründen der Wirtschaftlichkeit von Transport und Lagerung. Die Lagerungstemperatur von LNG beträgt unter Atmosphärendruck rund $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$, was beim Entwurf und der konstruktiven Durchbildung von Lagerbehältern berücksichtigt werden muß.

Aus Gründen der Sicherheit werden LNG-Behälter zweischalig gebaut (Bild 1.1). Den eigentlichen Lagerbehälter stellt ein kreiszylindrischer Innenbehälter aus Nickelstahl oder Spannbeton dar. Er wird vom Außenbehälter aus Spannbeton durch eine Wärmedämmung abgetrennt, die Energieverluste vermindern soll. Infolge des hohen Brandwiderstands und der höheren Reißfähigkeit setzt sich auch für den Innenbehälter der Spannbeton durch. Für den Innentank ist als Betriebstemperatur die LNG-Temperatur vorzusehen, auch Temperaturzyklen zwischen $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ sind aus betrieblichen Gründen möglich. Für die Auslegung eines LNG-Behälters aus Spannbeton benötigt der Konstrukteur daher Angaben über das kryogene Werkstoffverhalten von Beton, Betonstahl und Spannstahl.

Der vorliegende Forschungsbericht befaßt sich mit Untersuchungen zum Tieftemperaturverhalten schweißgeeigneter Tempcore-Betonstähle hoher Streckgrenze. Diese, seit Anfang der achtziger Jahre nach dem Tempcore-Verfahren hergestellten Betonstähle haben im Laufe der Jahre eine zunehmende Bedeutung auf dem internationalen Betonstahlmarkt erlangt, so daß eine eingehende Materialuntersuchung im Hinblick auf die Tieftemperatureignung geboten schien.

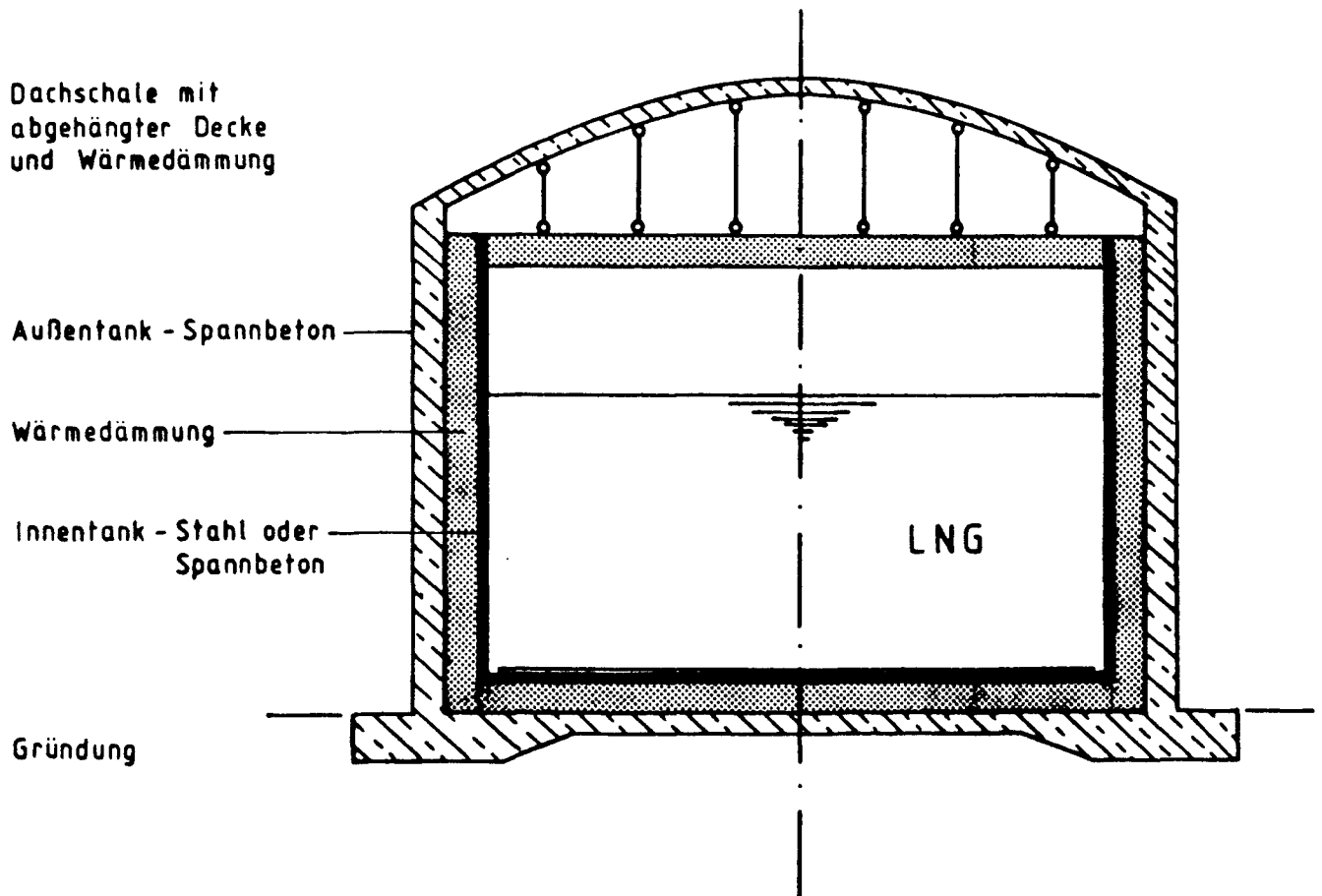


Bild 1.1 Ausbildungsmöglichkeit eines zweischaligen
LNG - Lagerbehälters

(nach [10])

2. DAS TEMPCORE-VERFAHREN

In der Neufassung der DIN 488 T1, Ausgabe 1984, werden nur noch schweißgeeignete Betonstähle hoher Streckgrenze erfaßt, um einerseits eine Vereinheitlichung der Verarbeitungsbedingungen und daraus resultierend eine verbesserte Sicherheit und andererseits eine mit der Neufassung der EURONORM 80 im Einklang stehende Reduzierung der Sortenvielfalt zu erzielen.

Die Schweißbeignung der Stähle wird hierbei durch Grenzwerte für die chemische Zusammensetzung gewährleistet (siehe Tabelle 5.1). Folgende Herstellverfahren sind laut Norm zugelassen:

- warmgewalzt ohne Nachbehandlung (alte Bezeichnung RUS)
- warmgewalzt, aus der Walzhitze wärmebehandelt (Tempcore, alte Bezeichnung RTS)
- kaltverformt durch Verwinden oder Recken des warmgewalzten Ausgangsmaterials (alte Bezeichnung RK).

Das Herstellverfahren ist weder aus der neuen Normbezeichnung der Betonstähle zu ersehen, noch aus den Walzkennzeichen abzulesen.

Der Schwerpunkt der Anforderungen an die Betonstähle liegt bei der Streckgrenze und der Schweißbeignung.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden je nach Herstellungsverfahren verschiedene Wege beschritten:

- Für die technologischen Eigenschaften der unbehandelten Betonstähle ist deren chemische Zusammensetzung verantwortlich. Die Einstellung des Streckgrenzenwertes im Walzzustand erfolgt durch die Erzeugung einer ferritischen Grundmasse mit einer durch Mangan erzeugten Mischkristallverfestigung und mit einem Anteil an Perlit, wobei der Perlitanteil über den Kohlenstoffgehalt gesteuert wird. Der Kohlenstoffgehalt ist allerdings begrenzt durch die Anforderungen an die Zähigkeit, an die Umformbarkeit und an die generelle Schweißbeignung. Deshalb werden Elemente wie

Niob und/oder Vanadin zulegiert, die eine Kornfeinung und festigkeitssteigernde Ausscheidungen bewirken.

- Bei den kaltverformten Betonstählen bestimmen die chemische Zusammensetzung und die Kaltverformung die Stahleigenschaften. Hier wird durch die Kaltverformung des ferritisch-perlitischen Ausgangsgefüges, die eine Erhöhung der Versetzungsdichte im Gefüge zur Folge hat, die geforderte Festigkeit bei guter Schweißbeignung erreicht. Die warmgewalzten Stäbe werden abschließend durch Recken oder Verwinden kaltverfestigt und so auf den geforderten Streckgrenzenwert gebracht.

- Die wärmebehandelten Betonstähle werden durch Abkühlung mit geregelter Temperaturführung aus der Walzhitze hergestellt. Bei diesem Herstellungsverfahren ist die Ausgleichs- bzw. Anlaßtemperatur der martensitischen Randschicht - neben der chemischen Zusammensetzung, der im Walzzustand ebenfalls ein ferritisch-perlitisches Gefüge entsprechen würde - wesentlich für den geforderten Streckgrenzenwert.

Gegenüber den kaltverformten Stählen wird bei den Tempcore-Stählen ein Arbeitsgang (Verwinden oder Recken) eingespart, gegenüber den unbehandelten Stählen erübrigt sich die Zugabe teurer Legierungselemente. Tabelle 2.1 zeigt die wirtschaftliche Bedeutung des Tempcore-Verfahrens anhand des in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit überwiegend verwendeten Stabstahles BSt 500 S.

Das Tempcore-Verfahren ist ein von Centre de Recherches Métallurgiques (C.R.M.), Lüttich, in Zusammenarbeit mit einigen Hüttenwerken entwickeltes Herstellungsverfahren für Betonstähle. Die wesentlichen Schritte und Einflußgrößen dieses Verfahrens sollen im folgenden kurz dargestellt werden /5, 7/.

	Anzahl der Herstellwerke	Angebotene Herstellart der Stähle		
		Warmgewalzt, ohne Nachbehandlung	Kaltverformt	Tempcore
Deutsche Herstellwerke	10	4	4	5
Ausländische Herstellwerke	25	18	0	9

Quelle: Betonkalender 1988 Stand: Januar 1987

Tabelle 2.1 Marktübersicht über angebotene Herstellverfahren für BSt 500 S nach DIN 488.

Die erste Phase besteht aus dem schnellen Abkühlen des aus der Walzstraße austretenden Stahlstranges in einer Wasserkühlstrecke. Es entsteht ein abgeschrecktes Randgefüge aus Martensit, mit noch austenitischem Kerngefüge und zum Rand zunehmenden Martensitanteil. Das Abschrecken dauert rund 1 Sekunde.

In der zweiten Phase findet ein Temperatúrausgleich an Luft statt. Der hohe Temperaturgradient bewirkt das Anlassen der martensitischen Randschicht durch die nachlaufende Kernwärme. Gleichzeitig wird der nicht umgewandelte Austenitanteil des Randgefüges in Zwischenstufengefüge umgewandelt. Die zweite Phase ist beendet, wenn die Staboberfläche die Anlaßtemperatur erreicht hat. Die Dauer dieser Phase beträgt zwischen 5 und 10 Sekunden.

Die dritte Phase besteht aus einer langsamen Abkühlung an ruhender Luft, in deren Verlauf das austenitische Kerngefüge einer isothermischen Umwandlung unterworfen wird. Es entsteht entweder ein ferritisch-perlitisches Kerngefüge oder ein ferritisch-perlitisches Kerngefüge mit Zwischenstufenanteil.

Das Gefüge und die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Tempcore-Betonstähle werden maßgeblich beeinflusst durch die Temperatur, mit der der Walzstahl in die erste Abkühlphase (Kühlstrecke) eintritt und von der Dauer der ersten Phase.

Je länger die Dauer der ersten Phase, desto größer der Anteil des abgeschreckten Gefüges am Querschnitt, desto geringer die Anlaßdauer des Martensits, desto tiefer die Übergangstemperatur von Austenit zu Ferrit-Perlit im Kern, desto größer der Anteil an Zwischenstufengefüge. Ein Stahl mit langer Abschreckdauer bildet also eine harte, spröde, da nur kurzzeitig angelassene martensitische Randschicht mit Zwischenstufenanteil. Bei kurzer Abschreckdauer unterbleibt die Zwischenstufenbildung, das Randgefüge hat eine geringere Härte aber eine erhöhte Zähigkeit durch die intensivere Entspannung beim Anlassen. Je höher die vor Beginn des Abschreckens vorhandene Temperatur (z. B. bei Stäben großen Durchmessers), desto größer die abzuführende

Wärmemenge. Hieraus resultiert eine längere Abschreckdauer mit den oben beschriebenen Folgen. Darüber hinaus beeinflussen auch der Kohlenstoff- und Mangangehalt Eigenschaften und Gefüge der Stähle. Bild 2.1 zeigt die zeitabhängige Temperaturverteilung über den Stabdurchmesser 25 mm bei einer Anfangstemperatur von 900 °C. Bild 2.2 zeigt die Temperaturentwicklung für ein Martensit-Ferrit-Gefüge (Linie a), sowie die Temperaturentwicklung für ein Gefüge mit Zwischenstufengefüge (Linie b) infolge geringerer Abschrecktemperatur.

Die Variationsmöglichkeiten der Herstellparameter des Tempcore-Verfahrens zeigen auf, daß es kein einheitliches Tempcore-Gefüge gibt und damit auch keine mechanischen Eigenschaften mit entsprechend geringer Streubreite erwartet werden können.

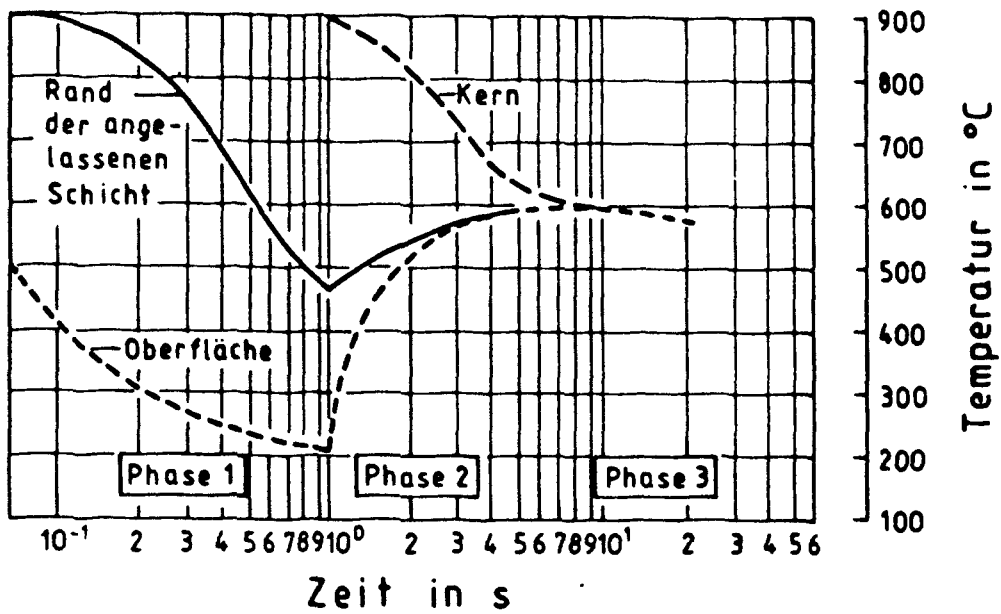


Bild 2.1 Zeitabhängige Temperaturverteilung beim Tempcore - Verfahren

(nach [7])

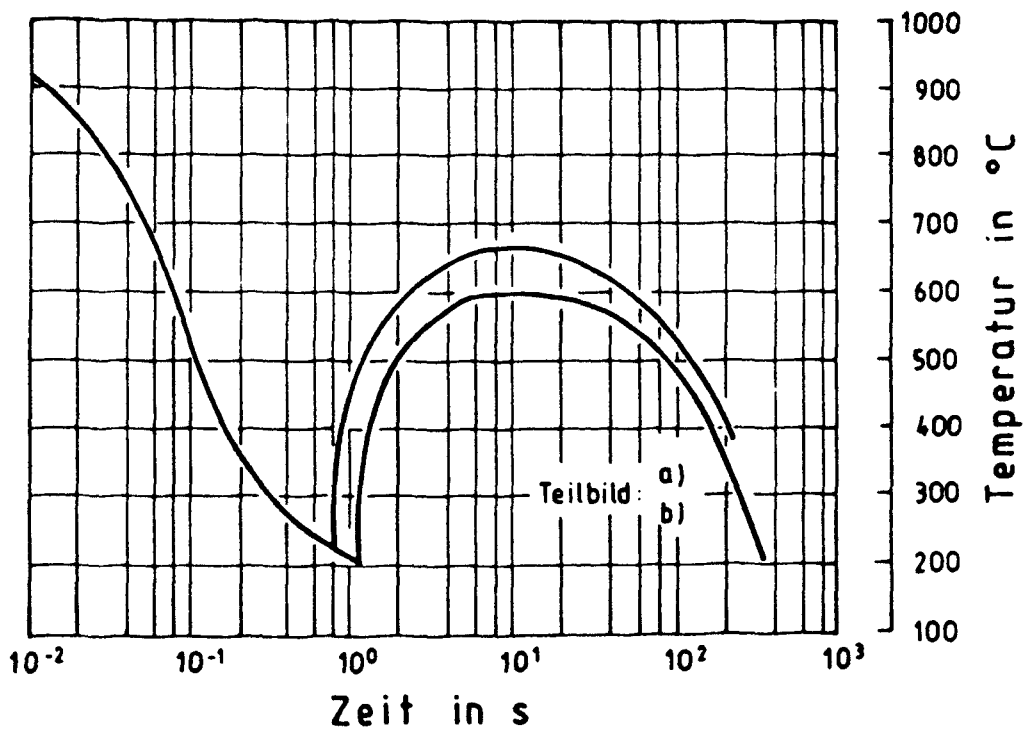


Bild 2.2 Beeinflussung des Gefügebau durch die Abschrecktemperatur

(nach [6])

3. VERWENDUNG VON BETONSTÄHLEN IM TIEFTEMPERATURBEREICH

Der Einsatz eines Stahles im Tieftemperaturbereich setzt voraus, daß die bei sinkender Temperatur eintretenden Eigenschaftsänderungen bekannt sind.

Grundsätzlich weisen alle Stähle eine Zunahme der Festigkeitseigenschaften und eine Abnahme des Verformungsvermögens auf. Wesentlich für die Beurteilung der Eignung eines Stahles im Tieftemperaturbereich ist die Abnahme des plastischen Verformungsvermögens. Ein sprödes Bruchverhalten muß für die vorgesehenen Betriebstemperaturen ausgeschlossen sein. Für die Verformungseigenschaften wird der Sprödbereich als der auf einen Steilabfall der untersuchten Eigenschaft folgende Bereich auf niedrigerem Verformungsniveau gedeutet. Bei mikroskopischen Bruchuntersuchungen gilt das Vorhandensein von Spaltflächen als Sprödbbruchmerkmal.

Die hier untersuchten ferritischen Stähle (unlegierte bzw. niedriglegierte Stähle, z. B. die genormten Baustähle und Betonstähle) zeigen im Tieftemperaturbereich einen Steilabfall der Verformungseigenschaften (siehe auch /11/). Bild 3.1 zeigt den prinzipiellen Verlauf für ferritische Stähle für die Bruchspannung R_u mit einem Steilabfall und anschließender Annäherung an $R_{p0,2}$ bzw. R_{eH} sowie den Verlauf der Brucheinschnürung Z . Grundlage der Materialauswahl ferritischer Betonstähle ist also die Kenntnis desjenigen Temperaturbereiches, in dem ein Steilabfall der die plastische Verformbarkeit des Stahles beschreibenden Eigenschaft vorliegt.

Die zu diesem Zweck zu untersuchenden Verformungskenngrößen sind neben der Brucheinschnürung Z und der Bruchdehnung A_5 bzw. A_{10} auch die Gleichmaßdehnung A_g , da die im Zugversuch im Bruchzustand zu messende Verformung des Stahles zum überwiegenden Teil aus der Gleichmaßdehnung resultiert.

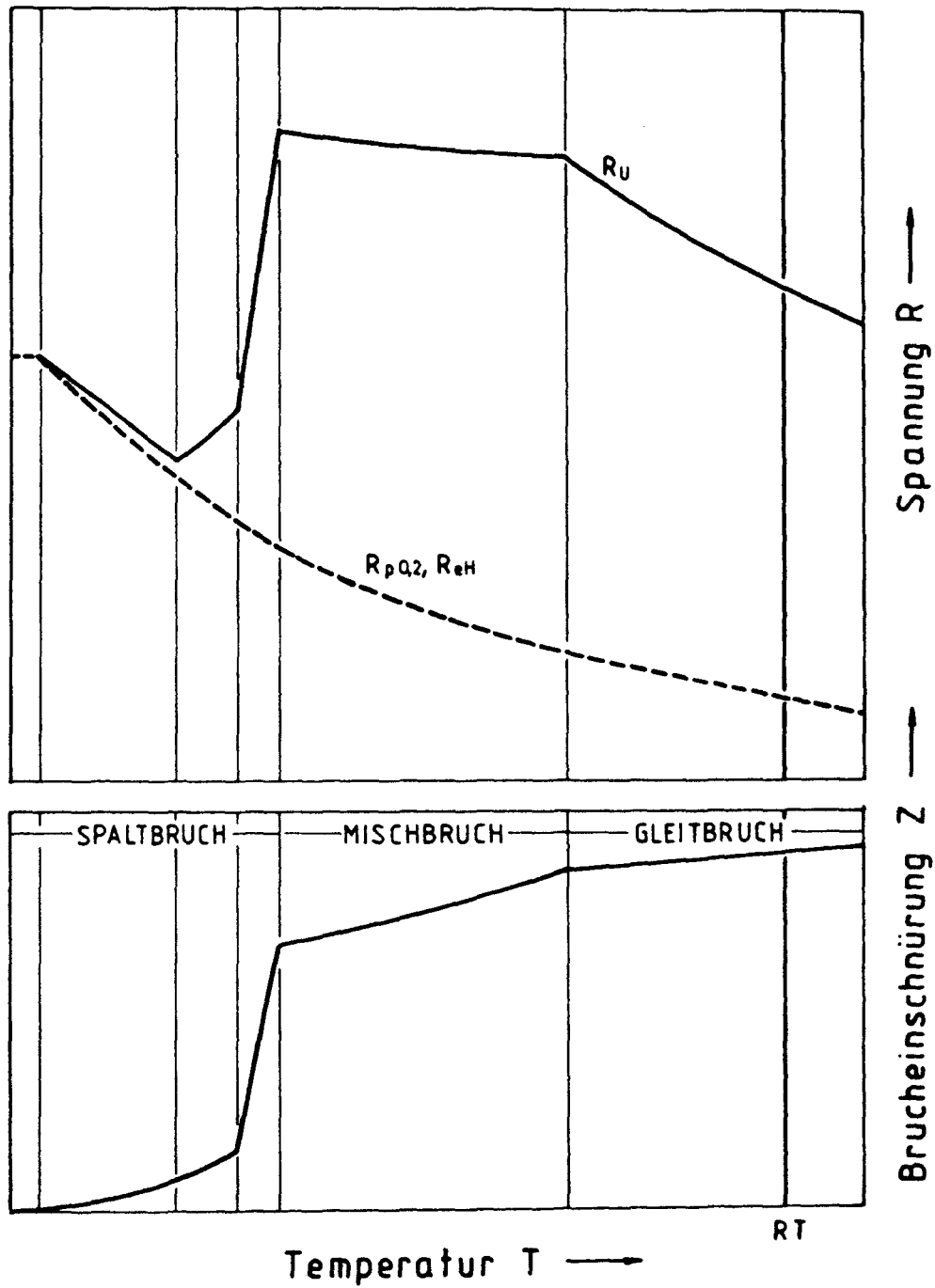


Bild 3.1 Temperaturabhängigkeit der mechanischen Kenngrößen ferritischer Stähle
(nach [11])

Daher ist auch die Untersuchung der Gleichmaßdehnung im Tieftemperaturbereich notwendig, wenngleich in der überwiegenden Zahl der z. Z. veröffentlichten Untersuchungen über ferritische Stähle diese Angaben fehlen.

Schließlich ist auch die Kerbempfindlichkeit von Betonstählen ein Auswahlkriterium. Hierzu sind systematische Untersuchungen an gekerbten Zugproben notwendig, die jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit waren. Das im Abschnitt 2 beschriebene Gefüge der Tempcore-Stähle mit seinem martensitischen Randgefüge weist auf eine erhöhte Sprödbruchgefahr durch Kerbwirkung hin, die auch in verschiedenen Veröffentlichungen /22, 23, 24/ nachgewiesen wurde.

4. UNTERSUCHUNGEN ZUM FESTIGKEITS- UND VERFORMUNGS- VERHALTEN VON BETONSTÄHLN IM TIEFTEMPERATURBEREICH

4.1 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm umfaßte:

- die chemische Analyse der Untersuchungsmaterialien (Abschnitt 4.3, 5.1)
- die Gefügebeschreibung anhand metallographischer Schliffbilder (Abschnitt 4.4, 5.2)
- die Gefügebeschreibung anhand von Härtemessungen (Abschnitt 4,5, 5.3)
- dilatometrische Messungen (Abschnitt 4.6, 5.4)
- quasistatische Zugversuche an ungekerbten Betonstahlproben (Abschnitt 4.7, 5.5)
- Untersuchung der Bruchmerkmale im Rasterelektronenmikroskop (Abschnitt 4.8, 5.6).

4.2 Untersuchungsmaterialien

Es wurde der schweißgeeignete Tempcore-Betonstahl mit dem Nenndurchmesser von 20 mm :

BST 500 S - 20 (alte Bezeichnung: BST 500/550 RTS - 20)

untersucht. Zu Vergleichszwecken wurde das Material zweier Hersteller (Probenbezeichnung: A und B) in das vorstehende Untersuchungsprogramm aufgenommen.

4.3 Chemische Analyse der Untersuchungsmaterialien

Die chemische Analyse der Betonstähle wurde mit Hilfe der Lichtemissionsspektroskopie im Vakuum durchgeführt. Der Stickstoffgehalt wurde nach dem Schmelzextraktionsverfahren und der Schwefelgehalt zusätzlich naßchemisch ermittelt /25/.

4.4 Gefügebeschreibung anhand metallographischer Schliffbilder

Für die makroskopische und mikroskopische Gefügebeschreibung der Betonstähle sowie für Mikrohärtemessungen über den Stahlquerschnitt wurden Längs- und Querschliffe angefertigt.

4.5 Gefügebeschreibung anhand von Härtemessungen

Die Härtemessungen sind an ungeätzten Querschliffen durchgeführt worden. Es wurde die Vickers-Härte HV 0,5 nach DIN 50 133 in senkrecht aufeinander stehenden Richtungen über den Stahlquerschnitt bestimmt, wobei der mittlere Abstand zwischen den einzelnen Eindrücken 0,5 mm betrug.

4.6 Dilatometrische Messungen

Die Untersuchungen wurden an einem Horizontal-Dilatometer mit induktiven Wegaufnehmern durchgeführt. Die Längenänderung wurde kontinuierlich gemessen, die Temperierung der Proben geschah durch geregelte Einspritzung von Flüssigstickstoff. Die Ausgangslänge L_0 betrug 40 mm. Die konstante Abkühl- und Aufheizgeschwindigkeit betrug $2,5 \text{ K min}^{-1}$.

4.7 Quasistatische Zugversuche an ungekerbten Betonstahlproben

4.7.1 Prüfungsumfang

Ausgehend von der Normaltemperatur + 20 °C wurden die Zugversuche bei den Temperaturstufen - 60 °C, - 120 °, - 160 °C, - 180 °C durchgeführt. Folgende mechanisch-technologische Kenngrößen sind bestimmt worden:

- Elastizitätsmodul E
- 0,01 % Dehngrenze $R_{p0,01}$
- obere Streckgrenze R_{eH}
- Zugfestigkeit R_M
- wahre Zugfestigkeit $R_{\bar{M}}$
- Reißfestigkeit R_u
- Gleichmaßdehnung A_g
- Bruchdehnungen A_5 , A_{10} und $A_{L=3}$
- Lüdersdehnung $\epsilon_{Lü}$
- Brucheinschnürung Z

Zu jeder Temperaturstufe wurden pro Material mindestens drei auswertbare Versuche durchgeführt, wobei die Proben innerhalb der freien Einspannlänge brachen. Insgesamt wurden 70 Versuche durchgeführt, von denen 57 Versuche ausgewertbar waren.

4.7.2 Probenvorbereitung

Die Gesamtlänge einer Betonstahlprobe betrug 860 mm. Die mittlere Querschnittsfläche S_0 wurde durch die Bestimmung von Probenlänge und -gewicht gemäß DIN 50 145 ermittelt. Zusätzlich wurden an jeder Probe acht Messungen des Probendurchmessers d_L über den Längsrippen sowie des Probendurchmessers d_R zwischen den Querrippen durchgeführt. Für die Werte d_L und d_R wurden im Hinblick auf die Bestimmung der Einschnürung für jede Probe die Mittelwerte \bar{d}_L und \bar{d}_R gebildet. Die Proben erhielten im Abstand von 10 mm Markierungen auf der Längsrippe.

Auf eine besondere Bearbeitung der Proben im Verankerungsbereich wurde verzichtet. Vorversuche, bei denen die Proben auf einer Länge von ca. 100 mm zu beiden Enden auf den Durchmesser \bar{d}_L abgedreht worden waren, hatten gegenüber dem verwendeten Verankerungssystem (siehe 4.7.3) keine Vorteile erbracht.

4.7.3 Versuchseinrichtung

Die Zugversuche wurden in einer ölhydraulischen Zugprüfmaschine nach DIN 51 221 T1 durchgeführt. Die Zugbelastung erfolgte kraftgesteuert. Bild 4.1 zeigt den Versuchs- und Meßaufbau.

Die Temperierung der Zugproben erfolgte in einer doppelwandigen, wärmeisolierten Kammer. Durch eine Teilung in drei übereinander liegende Bereiche wurde für den Prüfbereich und die Verankerungsbereiche eine jeweils unabhängige Temperierung ermöglicht. Die geregelte Abkühlung erfolgte durch geregelte Einspritzung und Verwirbelung von Flüssigstickstoff /12/. Das Temperaturregelsystem eines Kammerbereiches besteht aus einem PID-Zweipunktregler. Dieser vergleicht die gemessene Kammertemperatur mit dem einstellbaren Sollwert und bildet aus der Differenz das Schaltsignal für das Magnetventil. Anlage 4.1 zeigt die zweiteilige Kältekammer mit eingebauter Probe und Meßsystem sowie die Geräteeinheit für die Temperaturregelung und die Anzeigeinstrumente. Die beiden Zugstangen wurden durch die Kältekammern geführt und von den Spannbacken der Prüfmaschine gefaßt. Auf dem probenseitigen Ende der Zugstangen sind Spannköpfe aufgeschraubt, die die Probenverankerung aufnehmen.

Für die Kraft-Verlängerungs-Diagramme wurde die Kraft direkt am Kraftmeßsystem der Prüfmaschine abgenommen, die Messung der Verlängerung erfolgte durch zwei an die Zugproben gegenüberliegend angeklebte induktive Wegaufnehmer nach elektrischer Mittelwertbildung der Einzelsignale (Anlage 4.2). Ferner wurde von jedem Zugversuch ein komplettes Maschinen-Diagramm aufgenommen, wobei die Zugkraft über dem Kolbenhub der Prüfmaschine bis zum Probenbruch aufgezeichnet wurde. Die Wegmessung erfolgte über einen induktiven Wegaufnehmer an der Fußplatte der Transportspindel der Prüfmaschinen-Traverse (Anlage 4.2). Der aufgezeichnete Weg enthält daher neben der Proben-

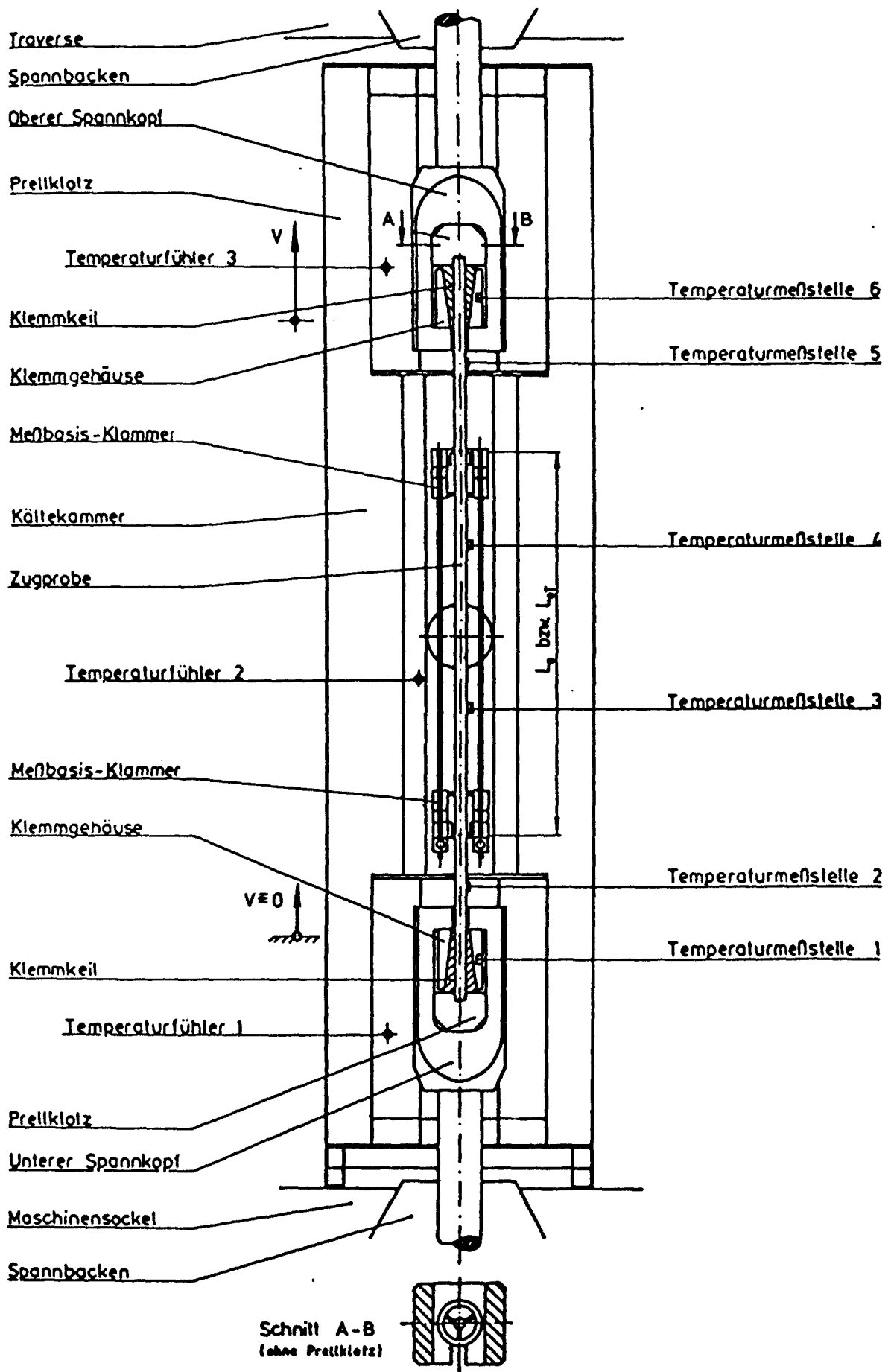


Bild 4.1 Aufbau des Zugversuches

(nach [11])

verlängerung auch den Schlupf der Probeneinspannung und Maschinennachgiebigkeiten. Sowohl Kraft-Verlängerungs-Diagramme als auch das Maschinendiagramm wurden mit x-y Flachschrift aufgetragen (Anlage 4.3).

4.7.4 Versuchsdurchführung

Das Versuchsprogramm sah sowohl die Bestimmung der mit dem Probenbruch verbundenen Kenngrößen (Zugfestigkeit, Reißfestigkeit) als auch Feindehnungsmessungen (E-Modul, Dehngrenzen) vor. Daher wurde die Durchführung zweier Versuchsserien notwendig. Zur Protokollierung der Höchstzugkraft und der Bruchkraft wurde ein Maschinendiagramm aufgetragen. Für die Bestimmung von E-Modul, 0,01 %-Dehngrenze und Lüdersdehnung wurden neben dem Maschinendiagramm drei weitere Kraft-Verlängerungs-Diagramme aufgetragen, wobei der Maßstab der Wegachse der zeichnerischen Ermittlung

1. des E-Modul und der 0,01 % Dehnkraft
2. der oberen Streckgrenze
3. der Lüdersdehnung

angepaßt wurde. Die Verlängerung wurde durch direkt an der Probe angeklebte induktive Wegaufnehmer aufgetragen.

Einzig bei den Raumtemperaturversuchen gelang es, beide Versuchsserien in einem Versuch durchzuführen. Nach dem Durchfahren des Fließbereichs wurde bei geöffneter Kältekammer das Meßsystem von der Zugprobe abgenommen, wobei der kontinuierliche Belastungsvorgang bis zum Probenbruch ohne Unterbrechung fortgesetzt wurde. Bei den Tieftemperaturversuchen war es nicht möglich, das Meßsystem bei laufendem Versuch abzunehmen, da dies in jedem Fall das Öffnen der Kältekammern bedingte.

Um ein Setzen der Verankerung zu erreichen, wurden die Proben einer Vorlast von 20 kN unterworfen. Anschließend wurde das Verlängerungsmeßsystem an die Probe angeklebt und ausgerichtet. Die Kontraktion der Zugprobe infolge

Wärmedehnung wurde durch eine Längenzugabe ausgeglichen. Um bei Prüfbeginn bei der Temperaturstufe T die Anfangsmeßlänge $L_0 = 500$ mm des Meßsystems zu gewährleisten, wurde bei Raumtemperatur das Meßgestänge mit der Anfangsmeßlänge $L_{0T} = L_0 + \varepsilon_{(T, T_0)} \cdot L_0$ ausgerichtet.

Zur Temperaturmessung wurde je ein Thermoelement an den Klemmgehäusen der Probenverankerung sowie vier Thermoelemente über die freie Länge der Zugprobe verteilt aufgeklebt. Nach Schließen der Kammer wurde unter konstanter Vorlast auf die vorgesehene Prüftemperatur abgekühlt. Anschließend wurde die Prüftemperatur 15 Minuten gehalten, um eine vollständige Durchkühlung der Probe zu erreichen. Nach einem elektrischen Abgleich der Wegaufnehmer-Meßbrücken wurde der Versuch begonnen. Die Abweichung der Kammertemperatur vom Sollwert wurde auf ± 1 °C begrenzt, die mittlere Kraftzunahme-Geschwindigkeit betrug $0,3 \text{ kN s}^{-1}$.

Für beide Versuchsserien wurden die Zugproben mittels Klemmkeilen und zugehöriger Klemmhülse verankert. Die Zugversuche wurden mit zweifacher Verankerung gemäß Bild 4.2 durchgeführt. Vor Versuchsbeginn wurden die Keile mit einem Abzieher zwischen Hülse und Betonstahl eingepreßt. Von den 41 durchgeführten Zugversuchen versagten 5 Proben infolge Kerbwirkung innerhalb des Einspannbereichs bei den Temperaturstufen -160 °C und -180 °C.

Für die Versuche mit Feindehnungsmessung mußte das Verankerungssystem verändert werden. Die Verankerung der Proben mit doppelten Klemmhülsen bewirkte ein unstetiges, ruckartiges Einziehen der Keile in die Hülse, was sich bei der Feindehnungsmessung in Form negativer Dehnversätze äußerte. Dies machte die Bestimmung von E-Modul und $0,01$ %-Dehngrenze unmöglich. Ursache hierfür ist der nicht exakt kreisrunde Querschnitt (Ellipse) der Betonstähle. Dieser hat zur Folge, daß bei der Verankerung mit Drittelkeilen

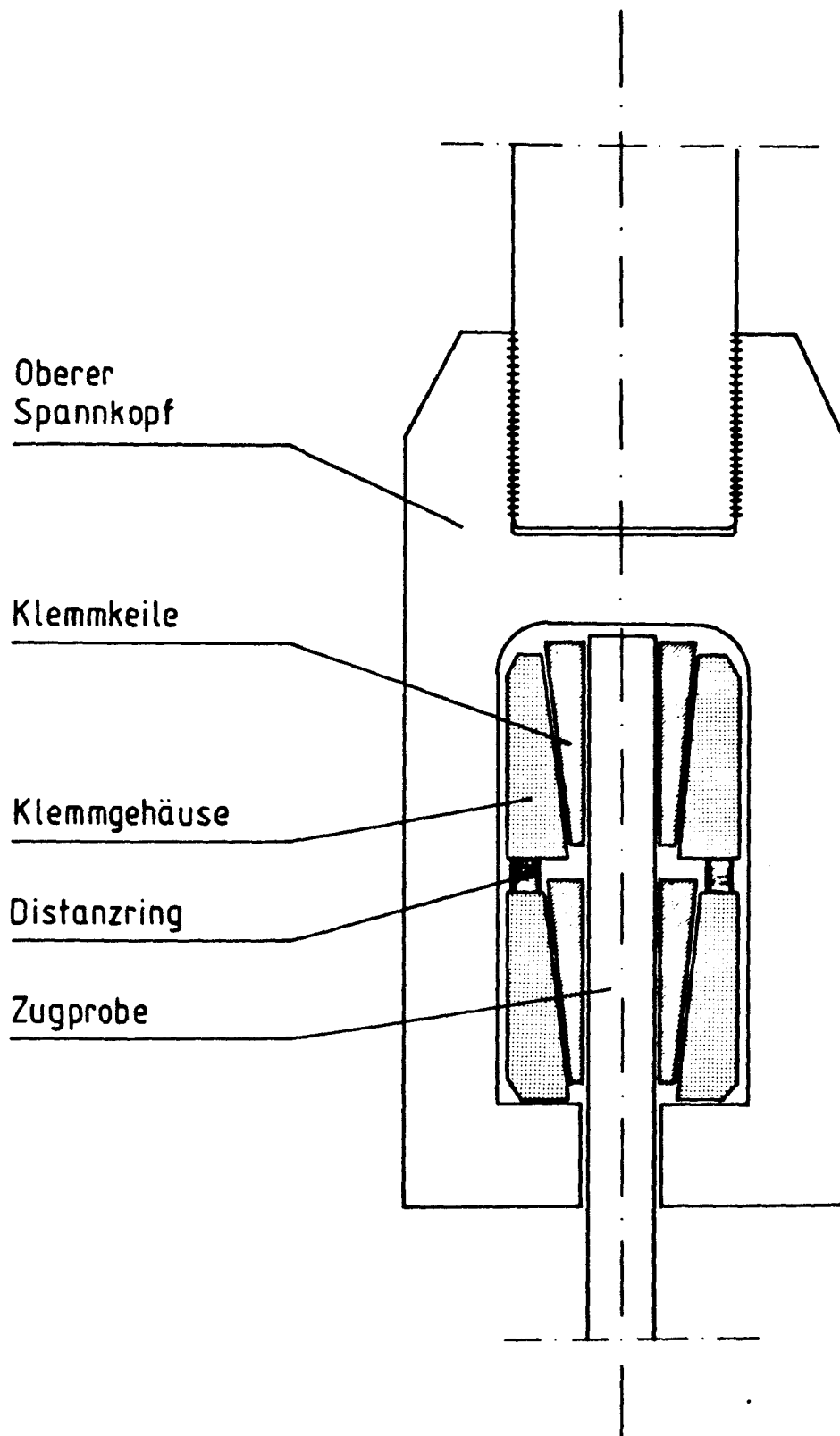


Bild 4.2 Keilverankerung für Zugversuche

nicht die gesamte Mantelfläche der Probe erfaßt wird, sondern die Krafteinleitung ausschließlich über die Querrippen erfolgt, während die Längsrippen sich nicht direkt an der Krafteinleitung beteiligen.

Für die Versuche mit Feindehnungsmessung wurden die ursprünglichen drei Klemmkeilsegmente nochmals der Länge nach geteilt. Hierdurch wurde erreicht, daß sich die Keilsegmente dem Querschnitt der Betonstahlprobe besser anpassen konnten. Ferner konnten diese sechs Klemmkeilsegmente gleichmäßig tief zwischen Hülse und Probe eingepaßt werden, so daß das Einpressen mit dem Abzieher verbessert wurde.

Die Durchführung von Zugversuchen mit Feindehnungsmessung bei $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ war einerseits wegen des unvorhersehbaren Sprödbruchs des Betonstahles nach Überschreiten der oberen Streckgrenze (siehe Abschnitt 5.5.1) und andererseits wegen der kraftgeregelten Steuerung der ölhydraulischen Prüfmaschine nicht möglich.

4.7.5 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Zugversuche erfolgte in Anlehnung an DIN 50 145, Ausgabe Mai 1975.

- Der E-Modul, die 0,01 %-Dehngrenze $R_{p0,01}$, die obere Streckgrenze R_{eH} und die Zugfestigkeit R_M wurden zeichnerisch aus den Kraft-Verlängerungs-Diagrammen und nach Division durch den Nennquerschnitt (mittlere Fläche S_0) ermittelt.

- Die wahre Zugfestigkeit $R_{\bar{M}}$ wurde aus der maximalen Kraft F_M nach Division durch den zugehörigen Probenquerschnitt ermittelt. Wird für die Probe über den Versuchsablauf Volumenkonstanz vorausgesetzt, so gilt:

im Ausgangszustand

$$V_0 = S_0 \cdot l_0$$

beim Kraftmaximum

$$V_M = S_M \cdot l_M$$

$$V_0 \stackrel{!}{=} V_M$$

$$l_M = l_0 \left(1 + \frac{A_g}{100} \right) \quad \text{mit } A_g [\%]$$

$$S_M = \frac{S_0 \cdot l_0}{l_0 \left(1 + \frac{A_g}{100} \right)} = \frac{S_0}{1 + \frac{A_g}{100}}$$

$$R_{\bar{M}} = \frac{F_M}{S_M} = \frac{F_M \left(1 + \frac{A_g}{100} \right)}{S_0} = R_M \left(1 + \frac{A_g}{100} \right)$$

Die wahre Zugfestigkeit $R_{\bar{M}}$ wurde in die Auswertung aufgenommen, da sich die Gleichmaßdehnung im untersuchten Temperaturbereich sehr stark ändert und somit eine Normierung der maximalen Zugkraft auf die Ausgangsfläche S_0 nicht sinnvoll erscheint.

- Die Reißfestigkeit R_u ergibt sich aus der im Maschinendiagramm vor dem Bruch ablesbaren Bruchkraft F_u und Division durch den Bruchquerschnitt S_u .

$$R_u = \frac{F_u}{S_u} \quad \text{mit} \quad S_u = S_0(100 - Z) \frac{1}{100}$$

mit $Z[\%]$

- Die Gleichmaßdehnung A_g , deren Anfangsmeßlänge $L_0 = 200$ mm betrug, sowie die Bruchdehnungen A_5 und A_{10} wurden nach DIN 50 145, Ausgabe Mai 1975, bestimmt.

- Die Bruchdehnung $A_{L=3}$ (Anfangsmeßlänge $L_0 = 30$ mm) wurde zusätzlich bestimmt, um einerseits die Ausdehnung des Einschnürungsbereiches über die Stablängsachse darzustellen und um andererseits den Verlauf der Einschnürung $Z_{(T)}$ über den untersuchten Temperaturbereich zu kontrollieren.

- Die Lüdersdehnung $\epsilon_{Lü}$ wurde zeichnerisch aus den Kraft-Verlängerungsdiagrammen als die plastische Dehnung im Übergang vom Fließbereich zur Verfestigung ermittelt.

- Für die Ermittlung der Einschnürung Z bei gerippten Betonstählen gibt es z. Zt. keine verbindlichen Regelungen. Laut DIN 50 145 gilt:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_u} \cdot 100 = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 [\%]$$

Bruchquerschnittsfläche S_u , da es sich nicht um eine kreisförmige Fläche handelt. Zur Findung eines möglichst einfachen Verfahrens sowie zur Beurteilung der Genauigkeit wurden zunächst an den Bruchufern von sechs Proben drei verschiedene Verfahren getestet.

(a) Messung des Durchmessers über die Längrippen

Das Verfahren ist mit einer Mikrometerschraube leicht durchführbar, ferner ist ein Messen an der Stelle des kleinsten Querschnitts immer möglich. Der gemessene Wert d_{LU} wird dem Mittelwert \bar{d}_L aus acht vor der Prüfung ermittelten Durchmessern gegenübergestellt:

$$Z_L = \frac{\bar{d}_L^2 - d_{LU}^2}{\bar{d}_L^2} \cdot 100 [\%]$$

(b) Messung des Kerndurchmessers zwischen den Querrippen

Auch hier wurde mit einer Mikrometerschraube gearbeitet, allerdings ist das Finden der Meßpunkte wesentlich schwieriger: Die Meßpunkte sollten zwischen den Querrippen, im Querschnitt mit der größten Einschnürung und sich auf der Mantelfläche gegenüberliegen. Die Bestimmung der Einschnürung erfolgte analog zu a):

$$Z_R = \frac{\bar{d}_R^2 - d_{RU}^2}{\bar{d}_R^2} \cdot 100 [\%]$$

(c) Querschnittsbestimmung mit dem Polarplanimeter

Die Projektion einer Bruchfläche wurden unter einem Auflichtmikroskop bei 10facher Vergrößerung abgezeichnet und anschließend mit einem Polarplanimeter integriert. Die Einschnürung ergab sich zu:

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 [\%]$$

Ein Vergleich der Ergebnisse der Einschnürungsmessungen ist in Tabelle 5.2 gegeben.

Folgende Anmerkungen sind zu den Verfahren (a) bis (c) notwendig: Verfahren (a) und (b) setzen voraus, daß die Einschnürung formtreu ist (da nur in einer Richtung gemessen wird); Verfahren (b) ist wegen der Meßpunktsuche sehr aufwendig und mit einer hohen Fehlerquote behaftet;

Verfahren (c) liefert nur eine horizontale Projektion der Bruchfläche. Im Falle einer geneigten und zerklüfteten Bruchfläche wird die wahre Bruchfläche nicht erfaßt.

Aus diesen Gründen wurde im Rahmen dieses Versuchsprogramms die Einschnürung Z_L nach Verfahren (a) bestimmt.

4.8 Bruchuntersuchungen im Rasterelektronenmikroskop

Die Untersuchung der mikrofraktographischen Merkmale von Bruchflächen wurde mit einem REM des Typs JEOL JSM 840 A durchgeführt. Dazu wurden nach Abschluß der Zugversuche und deren Auswertung einige Proben ausgewählt.

Wegen des Probendurchmessers von 20 mm war es auch bei kleinster REM-Vergrößerung nicht möglich, eine Übersicht der gesamten Bruchfläche darzustellen. Deshalb sind zusätzlich Makroaufnahmen der Bruchflächen gemacht worden, die auch Auskunft über die Topographie eines Bruchufers geben.

5. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

5.1 Ergebnisse der chemischen Analyse

Die Analysenergebnisse sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt. Zum Vergleich wurden in diese Darstellung auch die nach DIN 488 (1984) im Hinblick auf die Schweißbeignung geforderten Grenzgehalte aufgenommen. Diese Grenzgehalte werden von beiden Probenmaterialien deutlich unterschritten.

Der erhöhte Schwefel- und Vanadiningehalt des Materials B läßt auf eine Ausscheidungshärtung durch feindisperse Nitride und Karbonnitride schließen. Anhand der ermittelten Festigkeitskennwerte des Materials B kann die Wirkung dieses zusätzlichen Verfestigungsmechanismus gegenüber dem Material A jedoch nicht nachgewiesen werden.

5.2 Ergebnisse der Gefügeuntersuchung

Makrogefüge

Die Makrogefüge der Probenmaterialien anhand von Quer- und Längsschliffen werden in den Anlagen 5.1 und 5.2 wiedergegeben. Es handelt sich um typische Tempcore-Makrogefüge (siehe Abschnitt 2). Gegenüber dem Probenmaterial B (Anlage 5.2) zeigt das Probenmaterial A (Anlage 5.1) einen ausgeprägten Übergangsbereich zwischen dem Kernbereich und der Randzone.

In den Querschliffen sind die Kleinlast-Härteeindrücke zu erkennen.

Mikrogefüge

Die Mikrogefüge der Probenmaterialien, die den Makrogefügezonen in den Anlagen 5.1 und 5.2 zuzuordnen sind, werden durch die Anlagen 5.3 und 5.4 veranschaulicht. Die Randzonen beider Probenmaterialien bestehen aus

	DIN 488 T1 Ausgabe 1984	Probe B 14.1	Probe B 16.2	Probe A 16.4	Probe A 18.3
C	$\leq 0,24$	0,18	0,18	0,19	0,19
Si		0,26	0,26	0,21	0,20
Mn		0,895	0,885	0,635	0,633
P	$\leq 0,055$	0,031	0,031	0,027	0,026
S	$\leq 0,055$	0,029	0,028	0,016	0,015
N	$\leq 0,013$	0,0084	0,0082	0,0113	0,0113
Al		0,000	0,000	0,001	0,000
Cu		0,19	0,19	0,05	0,05
Cr		0,10	0,10	0,04	0,04
Ni		0,10	0,10	0,05	0,05
Mo		0,03	0,03	0,01	0,01
As		0,01	0,01	0,05	0,04
Sn		0,008	0,008	0,003	0,003
Ti		0,00	0,00	0,00	0,00
V		0,05	0,05	0,00	0,00
Nb		0,001	0,001	0,000	0,000

Tabelle 5.1 Ergebnisse der chemischen Analyse -
Angabe der Gehalte in Massenprozent

angelassenem Martensit, während im Kernbereich ein ferritisch-perlitisches Gefüge existiert. Der Perlitanteil des Probenmaterials B ist aber deutlich feinstreifiger. Das Mikrogefüge des Übergangsbereiches zwischen Randzone und Kernbereich unterscheidet sich in beiden Materialien nicht, es zeigt Zwischenstufengefüge. Das Probenmaterial A (Anlage 5.1) besitzt gegenüber dem Probenmaterial B (Anlage 5.2) jedoch einen ausgeprägten Übergangsbereich aus Zwischenstufengefüge zwischen dem ferritisch-perlitischen Randgefüge und dem martensitischen Kerngefüge. Dieser Gefügebau des Materials A weist auf eine niedrigere Abschrecktemperatur infolge einer verlängerten Abschreckdauer in der Kühlstrecke hin, woraus gegenüber dem Material B eigentlich auf eine höhere Festigkeit, aber eine niedrigere Zähigkeit in der Randzone zu schließen ist.

5.3 Ergebnisse der Härtemessungen

In den Bildern 5.1 und 5.2 sind die Ergebnisse der Härtemessungen dargestellt. Die Meßlinie A-A verläuft jeweils über die Längsrippen, während die Meßlinie B-B, die senkrecht zur Linie A-A steht, auch die Querrippen miterfaßt.

In Einklang mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.2 ergeben die Härtemessungen beim Probenmaterial A einen ausgerundeten Härteverlauf über den Probenquerschnitt. Dies weist auf einen stetigen Übergang von der Randzone zum Kerngefüge durch das Zwischenstufengefüge hin. Eine erhöhte Randhärte im Material A gegenüber dem Randgefüge von Material B konnte als Folge des Herstellungsprozesses nicht nachgewiesen werden. Beim Probenmaterial B zeigt der Härteverlauf einen steileren Übergang zwischen Rand- und Kerngefüge. Die Härte des Probenmaterials B liegt sowohl im Rand- als auch im Kernbereich auf etwas höherem Niveau. Die Ursache hierfür ist in der chemischen Zusammensetzung des Materials B zu sehen.

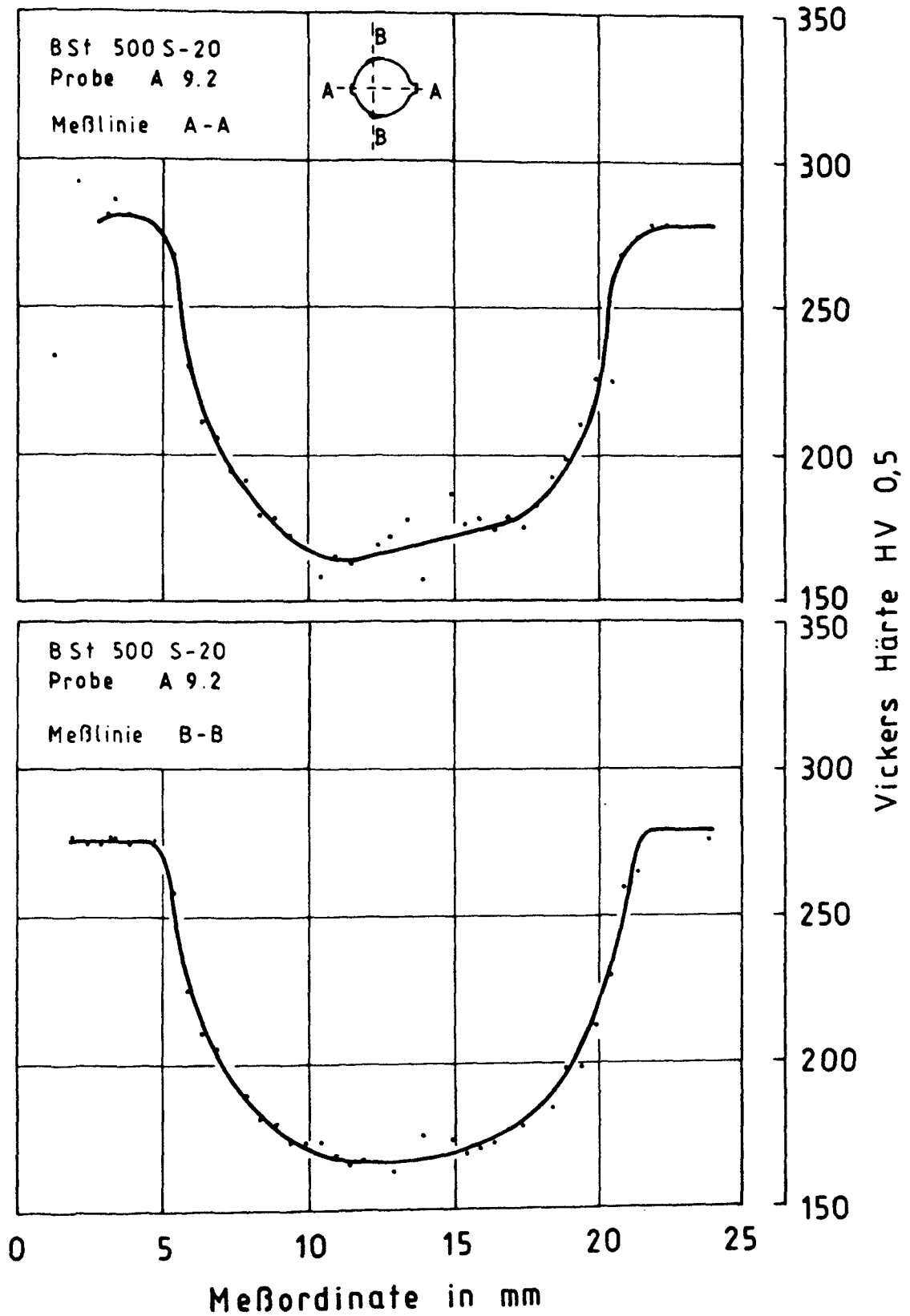


Bild 5.1 Härteverlauf über den Querschnitt des Probenmaterials A

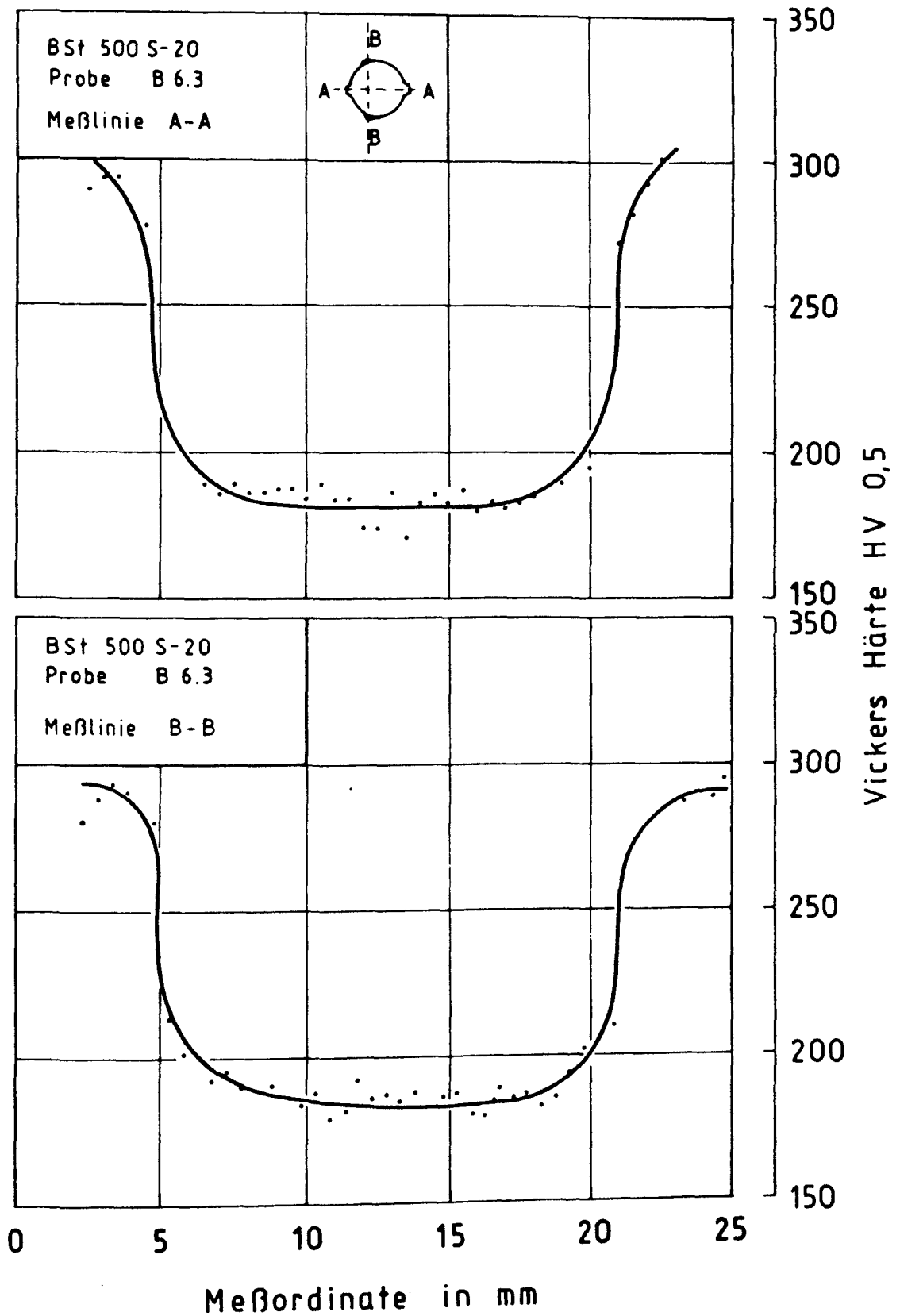


Bild 5.2 Härteverlauf über den Querschnitt des Probenmaterials B

5.4 Ergebnisse der dilatometrischen Messungen

Die Wärmedehnung ε_T ist für beide Materialien in Bild 5.3 dargestellt. Da die Proben mit kontinuierlicher Geschwindigkeit aufgeheizt und abgekühlt wurden, befanden sie sich während der Messung nicht in einem stationären Temperaturzustand. Die daraus resultierenden Abweichungen der Kurven für die Abkühl- und Aufheizphase wurde durch eine Mittelwertbildung pro Temperaturstufe ausgeglichen.

5.5 Ergebnisse der Zugversuche

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in den Bildern 5.4 bis 5.18 dargestellt. Hierzu ist anzumerken, daß in den Bildern die Mittelwerte aus mindestens drei Versuchsergebnissen mit den jeweiligen Streubreiten angegeben werden. Wegen der geringen Anzahl von Versuchsergebnissen pro Temperaturstufe sind die angegebenen Mittelwerte nur als Richtwerte für die Eigenschaftsänderungen der Tempcore-Betonstähle im Tieftemperaturbereich anzusehen.

In Tabelle 5.2 sind sämtliche Ergebnisse der Zugversuche zusammengestellt.

5.5.1 Maschinen-Diagramme

Zu Vergleichszwecken sind in den Bildern 5.4 und 5.5 die Maschinendiagramme, die bei verschiedenen Prüftemperaturen aufgezeichnet wurden, zusammengestellt. Bei der Bewertung dieser Diagramme ist folgendes zu berücksichtigen:

- Da es sich um Maschinendiagramme handelt, ist der E-Modul aus der Anfangssteigerung nicht ablesbar.

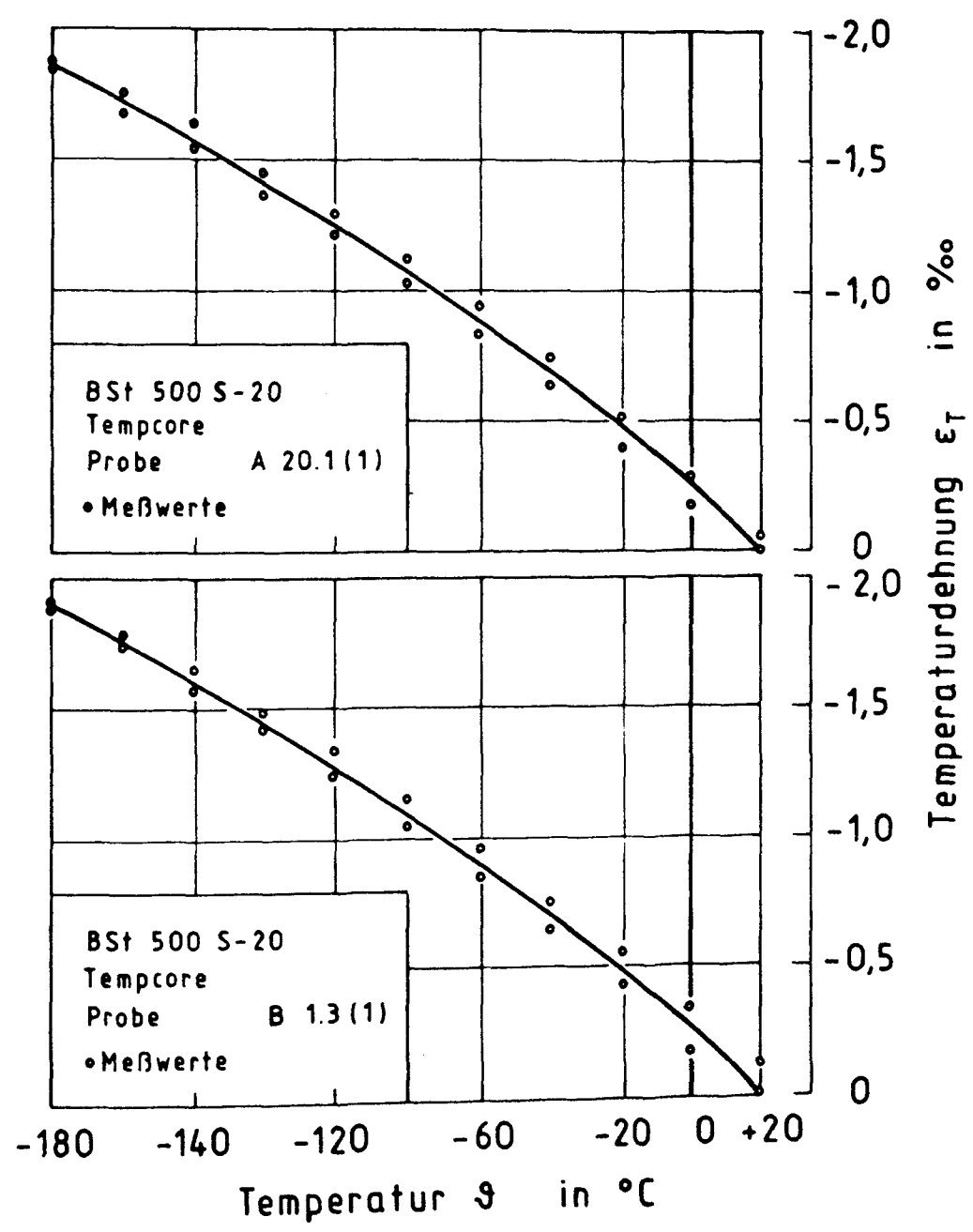


Bild 5.3 Temperaturdehnung ϵ_T des Probenmaterials A und B

Probe	Temperatur	E-Modul	R _{p0,01}	R _{eH}	R _M	R _M	R _U
	°C	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
A 5.1	+20			575	666	718	987
A 5.2	+20	213000	508	569	662	711	1093
A 6.1	+20			552	649	705	1016
A 6.2	+20	214000	498	549	650	724	982
A 7.1	+20	215000	518	570	664	720	1016
A 7.3	-160	244000	797	873			
A 8.1	-60			613	722	797	1123
A 8.3	-120			734	799	924	1163
A 8.4	-60	229000	571	619			
A 9.1	-120			741	812	903	1106
A 9.4	-120	238000	690	742			
A 10.1	-180			967	967	967	1283
A 11.1	-180			957	957	957	1200
A 12.1	-180			956	956	956	1143
A 12.3	-60	231000	567	635			
A 13.1	-120			730	795	896	1142
A 13.3	-60			618	720	799	1102
A 14.3	-60			615	720	799	1069
A 15.3	-160			879	888	956	1169
A 15.4	-160			869	880	975	1197
A 15.5	-160			880	891	983	1198
A 16.4	-60	235000	562	612			
A 16.5	-160	253000	842	868			
A 17.3	-120	238000	699	744			
A 17.4	-120	237000	686	737			
A 17.5	-120	245000	698	750			
A 18.3	-60	239000	563	621			
A 18.4	-160	258000	840	873			

Tabelle 5.2 Ergebnisse der Zugversuche - Probenmaterial A - Festigkeitswerte

Probe	Temperatur	E-Modul	$R_{p0,01}$	R_{eH}	R_M	$R_{\bar{M}}$	R_U
	$^{\circ}\text{C}$	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
B 2.1	+20	224000	546	591	678	746	1159
B 2.3	+20	217000	543	589			
B 2.4	+20	219000	542	586	676	741	1216
B 3.1	+20			597	684	751	1197
B 3.4	+20	218000	550	598			
B 4.1	+20			587	677	741	1161
B 4.4	-160			880	891	971	1345
B 5.1	-60			653	749	839	1245
B 5.4	-160			897	901	972	1419
B 6.1	-60			650	746	836	-
B 7.4	-160			891	899	969	1426
B 8.1	-120			740	820	935	1272
B 9.1	-180			982	982	984	1449
B 10.2	-180			979	979	979	1327
B 10.4	-180			983	983	986	1402
B 11.1	-120			743	822	922	1335
B 11.4	-160	249000	850	886			
B 12.4	-120	241000	714	742			
B 12.5	-120			744	822	913	1287
B 12.6	-60			653	747	845	1208
B 14.1	-120	241000	725	805			
B 14.2	-120	240000	722	751			
B 14.3	-60	230000	617	648			
B 15.1	-60	230000	608	650			
B 15.2	-160	250000	850	891			
B 15.3	-160	251000	853	890			
B 15.5	-60	232000	599	647			
B 15.6	-180			990	-	-	-
B 16.2	-60	228000	612	658			

Tabelle 5.2 Ergebnisse der Zugversuche - Probenmaterial B - Festigkeitswerte

Probe	Temperatur	Fläche S_0	d_L	d_R	$A_{L=3}$	A_5	A_{10}	A_g	Z_L	Z_R	Z	$\epsilon_{Lü}$
	°C	mm ²	mm	mm	%	%	%	%	%	%	%	%
A 5.1	+20	318,7	21,61	19,24	42	20	14	7	47			
A 5.2	+20	320,7	22,51	19,20	44	21	14	7	53			1,6
A 6.1	+20	322,2	22,78	19,25	45	22	16	8	52	53	67	
A 6.2	+20	322,1	22,85	19,23	41	21	16	11	46			1,6
A 7.1	+20	317,4	21,18	19,20	41	21	16	8	49			1,6
A 7.3	-160	317,8										-
A 8.1	-60	319,5	21,64	19,24	47	24	18	10	52			
A 8.3	-120	319,2	21,70	19,20	46	26	20	15	48			
A 8.4	-60	319,5										2,0
A 9.1	-120	316,8	21,17	19,20	42	25	20	11	41			
A 9.4	-120	317,2										2,3
A 10.1	-180	312,0	20,88	18,93	32	16	9	0	41			
A 11.1	-180	317,0	21,00	19,17	31	15	7	0	36	35	38	
A 12.1	-180	317,1	21,11	19,18	30	14	7	0	31			
A 12.3	-60	317,0										1,9
A 13.1	-120	319,6	21,75	19,21	39	23	18	12	43			
A 13.3	-60	319,5	21,76	19,19	44	24	18	11	50			
A 14.3	-60	319,9	21,79	19,20	42	24	18	10	46			
A 15.3	-160	317,9	21,30	19,18	34	20	15	7	37	39	42	
A 15.4	-160	317,5	21,33	19,19	36	22	17	10	41			
A 15.5	-160	317,6	21,37	19,20	38	22	17	10	40			
A 16.4	-60	320,0										2,0
A 16.5	-160	319,7										-
A 17.3	-120	317,8										2,5
A 17.4	-120	317,5										2,4
A 17.5	-120	317,7										2,7
A 18.3	-60	320,2										1,9
A 18.4	-160	320,5										-

Tabelle 5.2 Ergebnisse der Zugversuche - Probenmaterial A - Verformungswerte

Probe	Temperatur	Fläche S_0	\bar{d}_L	\bar{d}_R	$A_{L=3}$	A_5	A_{10}	A_g	Z_L	Z_R	Z	ϵ_{L0}
	°C	mm ²	mm	mm	%	%	%	%	%	%	%	%
B 2.1	+20	315,4	21,05	19,67	48	23	16	9	60			1,5
B 2.3	+20	315,4										-
B 2.4	+20	315,3	21,06	19,64	47	23	16	9	58	57	52	1,5
B 3.1	+20	316,1	21,15	19,67	45	22	16	9	56			
B 3.4	+20	316,0										1,6
B 4.1	+20	313,3	20,55	19,65	45	23	16	9	55			
B 4.4	-160	313,4	20,52	19,62	42	22	16	8	50			
B 5.1	-60	315,9	21,15	19,74	47	25	20	12	54			
B 5.4	-160	316,0	21,18	19,77	45	22	16	7	56			
B 6.1	-60	315,7	21,07	19,63	48	26	19	12	-			
B 7.4	-160	315,9	21,15	19,70	46	23	18	7	58	60	57	
B 8.1	-120	313,5	20,58	19,62	47	25	19	14	52			
B 9.1	-180	315,9	21,08	19,73	44	16	9	0	56	61	58	
B 10.2	-180	314,8	20,89	19,68	38	16	8	0	49			
B 10.4	-180	314,8	20,89	19,75	44	21	12	0	56			
B 11.1	-120	314,6	20,85	19,71	46	25	18	12	56			
B 11.4	-160	314,6										-
B 12.4	-120	315,0										2,3
B 12.5	-120	315,0	20,97	19,71	45	25	19	11	52			
B 12.6	-60	315,1	20,97	19,64	47	25	18	13	53			
B 14.1	-120	315,2										1,9
B 14.2	-120	315,3										1,7
B 14.3	-60	315,4										1,9
B 15.1	-60	315,2										2,0
B 15.2	-160	315,2										-
B 15.3	-160	315,1										-
B 15.5	-60	315,1										2,0
B 15.6	-180	315,1	-	-	39	15	7	0	-			
B 16.2	-60	315,9										1,9

Tabelle 5.2 Ergebnisse der Zugversuche - Probenmaterial B - Verformungswerte

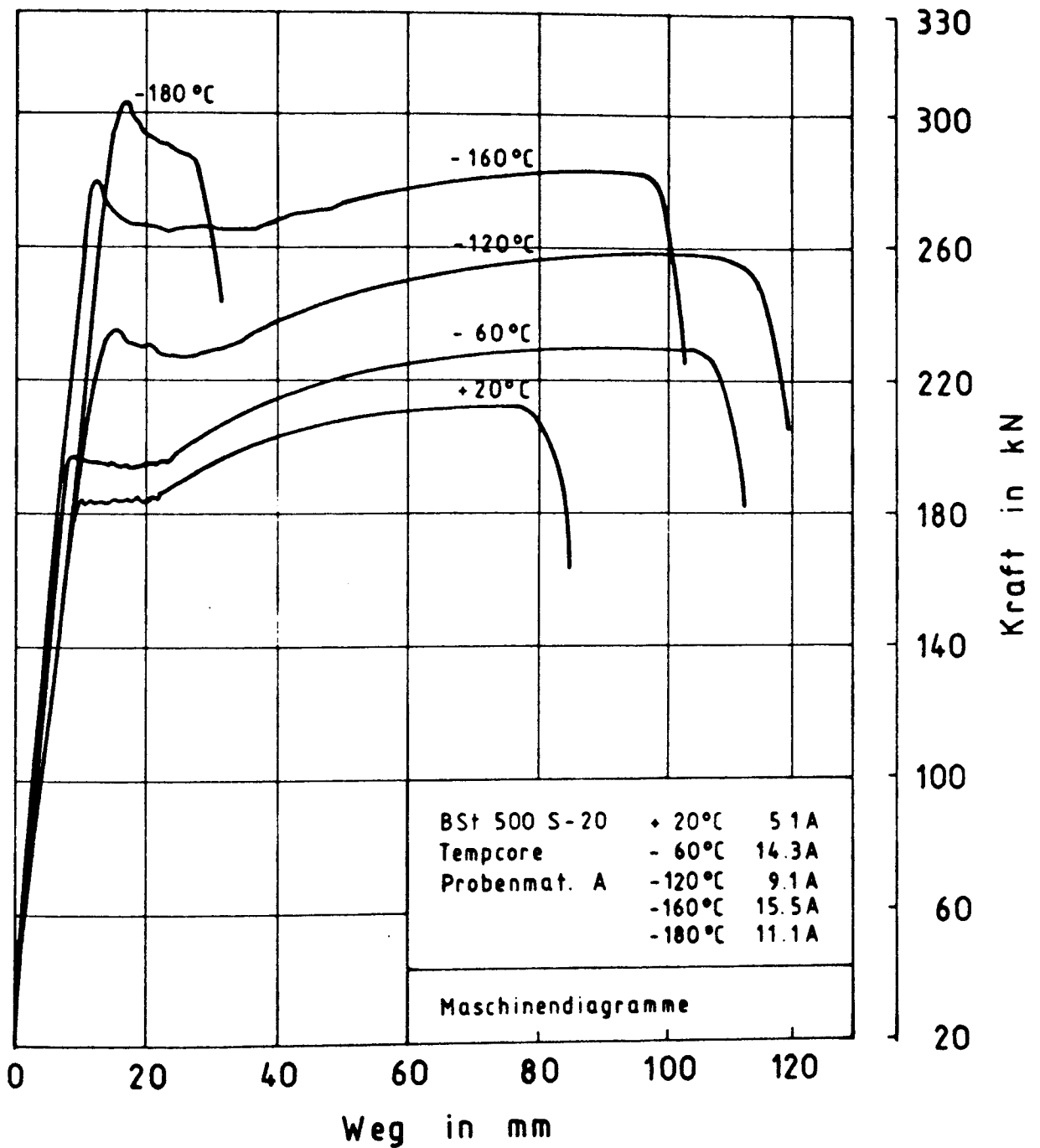


Bild 5.4 Maschinendiagramme für Proben des Probenmaterials A in Abhängigkeit von der Temperatur

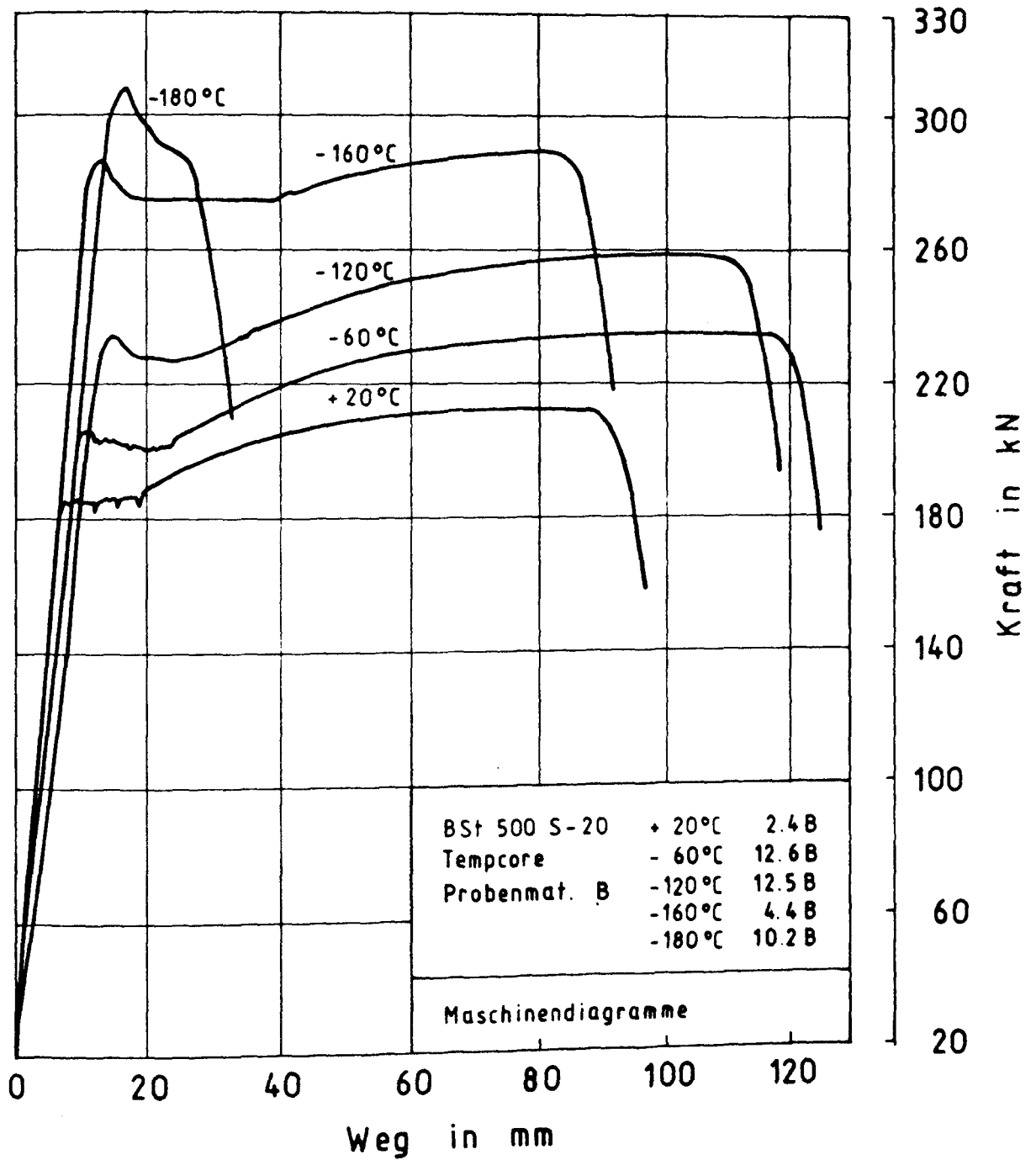


Bild 5.5 Maschinendiagramme für Proben des Probenmaterials B in Abhängigkeit von der Temperatur

- Die ausgerundete Form der oberen Streckgrenze R_{eH}
- sowohl im Maschinendiagramm als auch im Kraft-Verlängerungs-Diagramm - weist auf Biegespannungen in der Probe hin (siehe Erläuterungen zu DIN 51 221 Teil 1).

- Der Übergang von der oberen Streckgrenze R_{eH} zur unteren Streckgrenze R_{eL} wird von der Trägheit der Prüfmaschine beeinflusst.

Im Temperaturbereich von + 20 °C bis - 160 °C besitzen die Betonstähle eine ausgeprägte Streckgrenze mit einem Bereich konstanten Kraftniveaus. Dies weist auf eine inhomogene Dehnung über die Probenlänge im Belastungsbereich zwischen oberer Streckgrenze und Verfestigung hin /15/. Es existieren sowohl Bereiche elastischer Dehnung ϵ_{el} als auch plastischer Dehnung $\epsilon_{Lü}$ (Lüdersdehnung) nebeneinander (Bild 5.6). Bei Erreichen der oberen Streckgrenze R_{eH} bildet sich im schwächsten Querschnitt (Gefügeheterogenität) bzw. im Querschnitt mit der größten Beanspruchung (Mehrachsigkeit) ein primäres Lüdersband durch einen örtlich begrenzten Dehnungsanstieg von ϵ_{el} auf $\epsilon_{Lü}$. Zur Bewegung des Lüdersbandes über die Stabachse ist die der unteren Streckgrenze R_{eL} entsprechende Kraft erforderlich, die geringer als die zu R_{eH} gehörende Kraft ist (Bild 5.7). Der Bereich konstanten Kraftniveaus ist geprägt durch die Ausbreitung primärer Lüdersbänder über die Probenlänge sowie die Bildung sekundärer Lüdersbänder. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Lüdersbänder sowie die Form des Überganges von ϵ_{el} nach $\epsilon_{Lü}$ (Lüdersfrontbreite) sind neben der Prüftemperatur und der Belastungsgeschwindigkeit nach /15/ auch abhängig von der Korngröße. So wurden bei groben Körnern diffuse Übergänge mit großen Lüdersfrontbreiten und hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit festgestellt, während bei feinkörnigen Gefügen die Übergänge scharf und die Ausbreitungsgeschwindigkeit gering sind. Im Übergang zwischen Fließplateau und Verfestigung liegt makroskopisch wieder ein gleichförmiger Dehnungszustand mit $\epsilon_{Lü}$ für jeden Querschnitt der Stabachse vor.

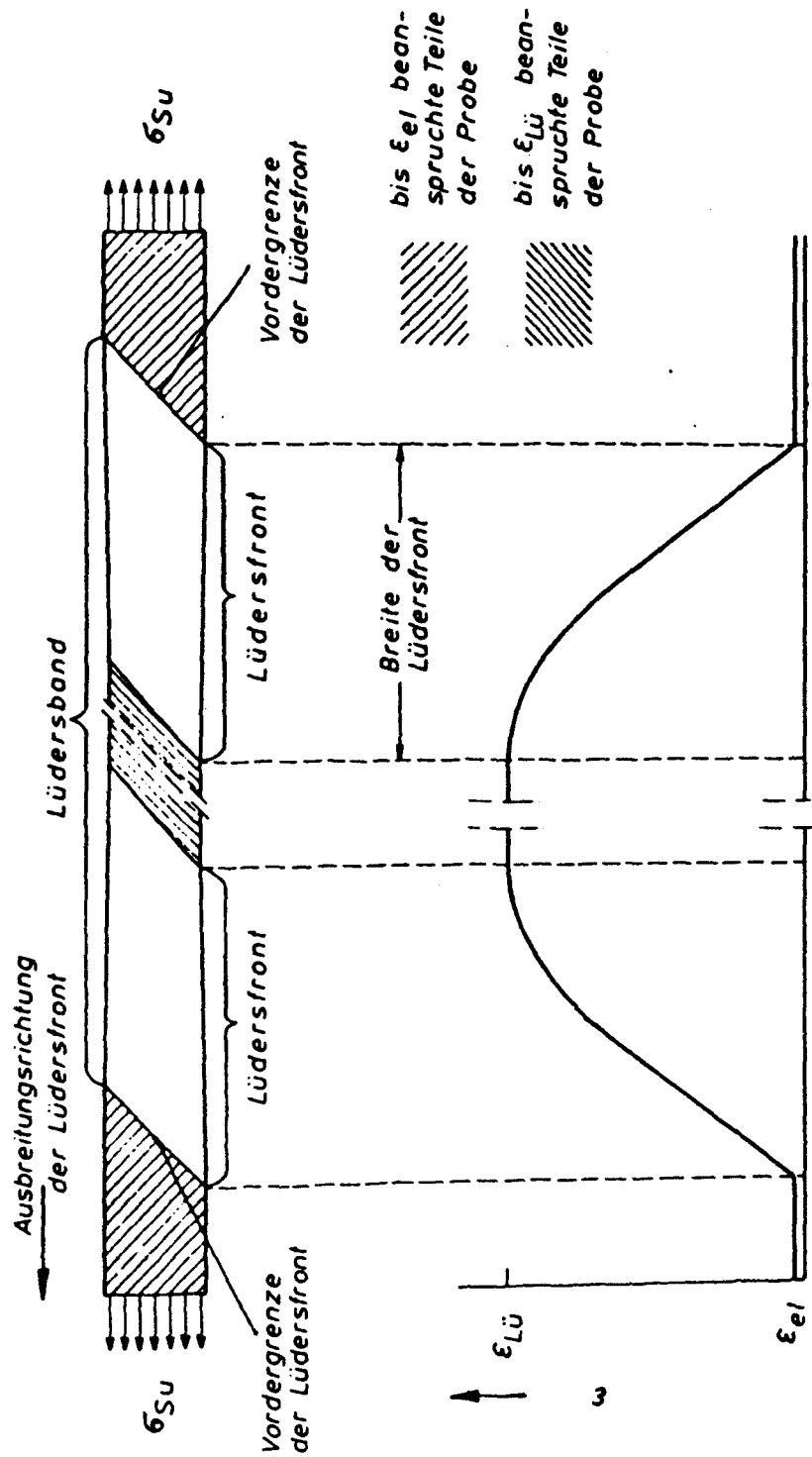


Bild 5.6 Dehnungsverteilung im Bereich eines Lüdersbandes

(nach [15])

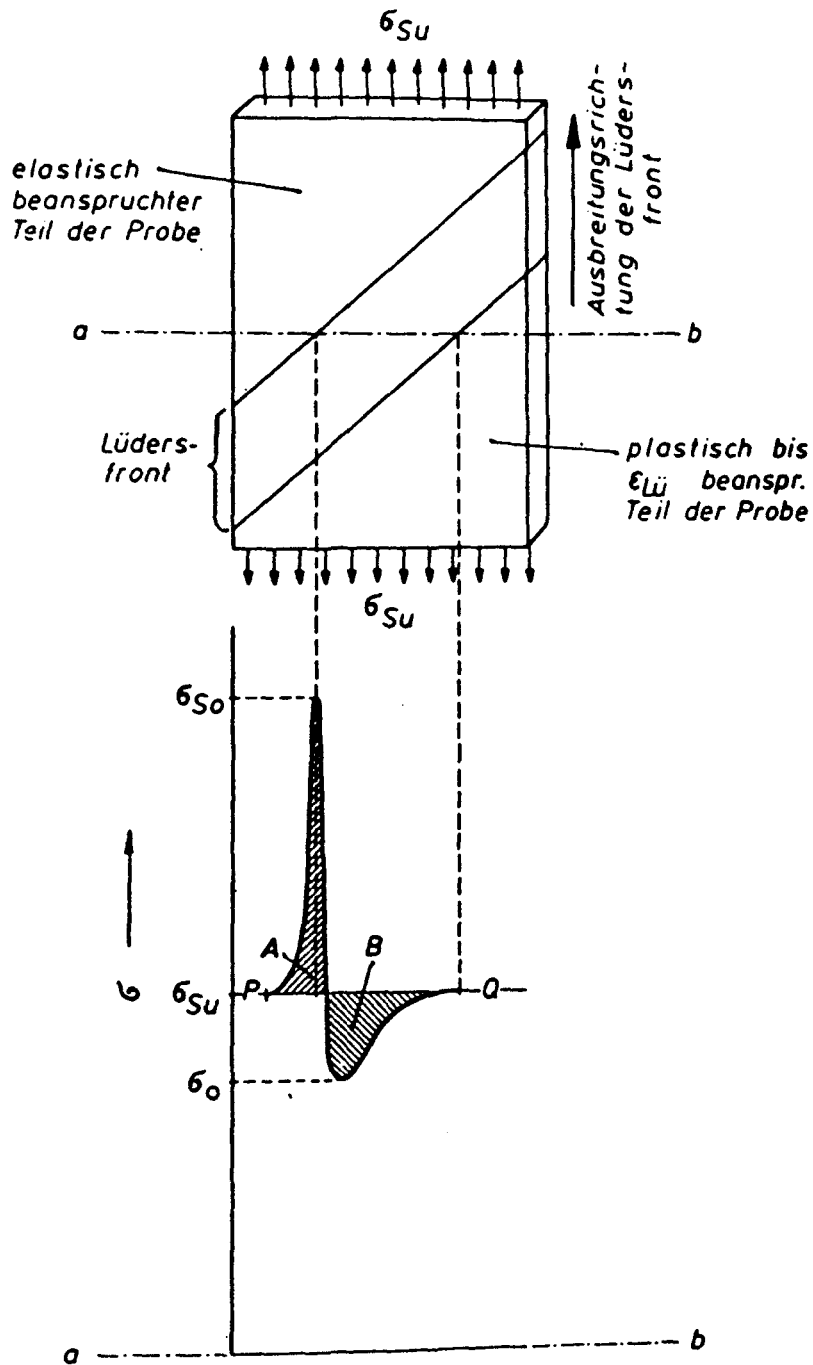


Bild 5.7 Spannungsverteilung im Bereich der Lüdersfront

(nach [15])

Bei angelassenen Vergütungsstählen (angelassenes martensitisches Gefüge) wird keine ausgeprägte Streckgrenze beobachtet. Dieses Härungsgefüge weist einen stetigen Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich der σ - ϵ -Linie auf.

Die untersuchten Tempcore-Stähle besitzen, wie die Gefügeuntersuchungen in Abschnitt 5.2 und 5.3 beweisen, ein Gefüge aus einer martensitischen Randzone und einem ferritisch-perlitischen Kernbereich unterschiedlicher Korngröße.

Aufgrund seines heterogenen Gefügebauaus ergibt sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Tempcore-Betonstahles aus der Summe der Eigenschaften seiner einzelnen Gefügeanteile. Der große Flächenanteil des Kerngefüges am Gesamtquerschnitt führt jedoch dazu, daß das ferritisch-perlitische Kerngefüge das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Tempcore-Betonstahles dominiert. Mit sinkender Temperatur steigt die obere Streckgrenze R_{eH} , d. h. die zur Induzierung von Lüdersbändern notwendige Spannung stark an. Gleichzeitig steigt auch die zur Ausbreitung der Lüdersbänder notwendige untere Streckgrenze R_{eL} an, jedoch nicht im gleichen Maß wie R_{eH} . Es entwickelt sich eine "Hemmschwelle"; der Spannungsabfall zwischen Induzierung der Lüdersbänder und ihrer Ausbreitung wird mit sinkenden Temperaturen größer.

Die Bruchdehnung und die Gleichmaßdehnung steigen bis -120°C bzw. -60°C an und fallen danach wieder ab. Diese Zunahme an plastischem Verformungsvermögen wurde auch in anderen Arbeiten /15, 23/ für ferritische Stähle beobachtet, ohne daß bisher Erklärungen hierfür bekannt wären.

Bei Temperaturen unterhalb von -160°C tritt ein anderer Bruchmechanismus auf:

Zwar kommt es noch zur Bildung primärer Lüdersbänder im Bereich der oberen Streckgrenze, aber vor der Ausbreitung dieser Bänder über die gesamte Probenlänge erfolgt bereits lokal eine Brucheinschnürung. Die Ausbreitung des

Lüdersbandes im grobkörnigen ferritisch-perlitischen Kerngefüge wird durch das martensitische Randgefüge behindert. Mit sinkenden Temperaturen baut sich ein anwachsender innerer Widerstand im Gefüge auf, der schließlich das Ausbreiten des Lüdersbandes verhindert. Bei weiterem Querschritt der Prüfmaschine geht das plastische Probenvolumen direkt in die Einschnürzone über.

5.5.2 Verformungskenngrößen

Lüdersdehnung $\epsilon_{Lü}$

Die Lüdersdehnung $\epsilon_{Lü}$ leitet in der Zugprobe im Anschluß an die elastische Formänderung unter einem abrupten Zugkraftabfall und danach unter Quasi-Zugkraftkonstanz, d.h. ohne Verfestigung, die plastische Formänderung ein. Erst nach Abschluß der inhomogenen Lüdersdehnung steigt die Zugkraft mit zunehmender Probenverlängerung bis zum Erreichen des dreiachsigen Spannungszustandes in der Einschnürzone der Zugprobe an.

Bei den unlegierten Stählen mit mittleren Kohlenstoffgehalten nimmt die Lüdersdehnung bis zum Erreichen der mit dem Minimum der Reißfestigkeit verbundenen Temperatur zu und fällt erst unterhalb dieser Temperatur ab, wenn der Bruch erfolgt, bevor die Lüdersfront die gesamte Probenlänge durchlaufen hat.

Die Lüdersdehnung wurde bei den Prüftemperaturen +20°C, -60°C und -120°C bestimmt. Für die Temperaturstufe -160°C liegen infolge eines Meßfehlers keine Ergebnisse vor. Bei der Prüftemperatur -180°C wurden bewußt keine Messungen mit dem an die Zugprobe angeklebten Verlängerungsmeßsystem durchgeführt, um das Risiko der Zerstörung des angeklebten Meßsystems bei einem Probenbruch auszuschließen.

Nach Bild 5.8 steigt die Lüdersdehnung beider Probenmaterialien erwartungsgemäß mit sinkender Temperatur an. Die Tendenz hängt eng mit dem zunehmenden

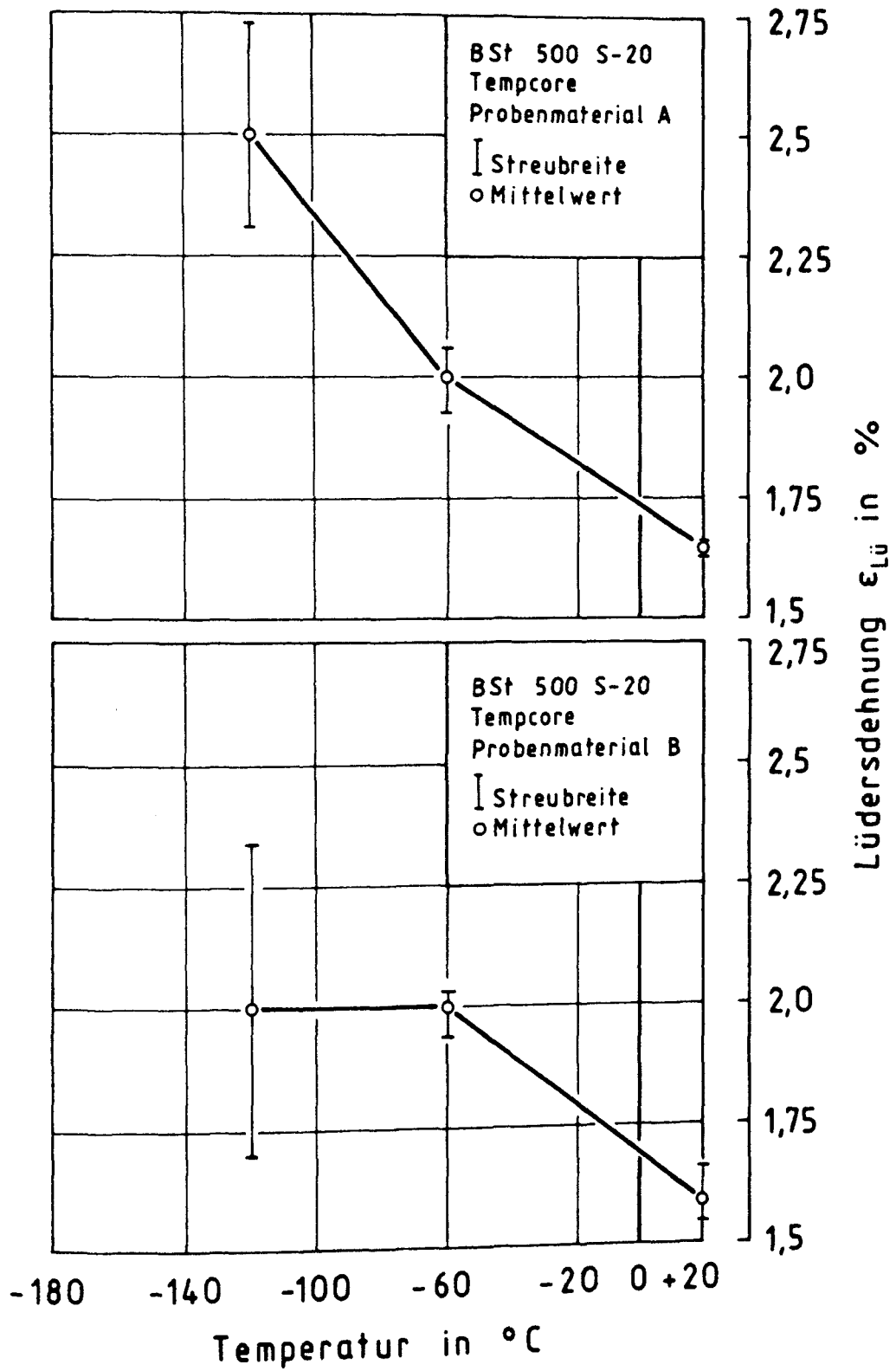


Bild 5.8 Lüdersdehnung $\epsilon_{Lü}$ für Probenmaterial A und B in Abhängigkeit von der Temperatur

Spannungsabfall von R_{eH} nach R_{eL} zusammen. Wie aus den Maschinendiagrammen (Bild 5.4 und 5.5) ersichtlich ist, sind die Lüdersdehnungen beider Materialien bei -160°C deutlich größer als bei -120°C . Nach dem Maximum bei -160°C hat die Lüdersdehnung bei -180°C wieder deutlich abgenommen.

Bruchdehnungen A_5 und A_{10} sowie Gleichmaßdehnung A_g

Die Bruchdehnungen A_5 und A_{10} sowie die Gleichmaßdehnung A_g verlaufen im betrachteten Temperaturbereich annähernd parallel (Bild 5.9 und 5.10). Die Dehnungen steigen von $+20^{\circ}\text{C}$ bis -120°C stetig an, zwischen -160°C und -180°C tritt ein Steilabfall ein. Beim Probenmaterial A steigt die Bruchdehnung A_{10} von im Mittel 16% bei $+20^{\circ}\text{C}$ (gefordert laut DIN 488: 10%) auf 20% bei -120°C und fällt dann auf 8% bei -180°C ab. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die Gleichmaßdehnung bei -180°C auf Werte kleiner 0,1% abfällt. Bei einigen Proben war es nicht möglich, auf einer Anfangsmeßlänge von 200 mm eine Gleichmaßdehnung zu ermitteln (siehe Tabelle 5.2). Die Gleichmaßdehnung liegt bei -180°C damit in der Größenordnung der zur oberen Streckgrenze zuzuordnenden plastischen Probenverformung. Dies steht mit dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Bruchmechanismus in Einklang.

Der gleichartige Kurvenverlauf von Bruchdehnung und Gleichmaßdehnung bei den untersuchten Tempcore-Betonstählen weist auf deutliche Einschnürungen Z auch bei -180°C hin.

Die Temperaturabhängigkeit der Dehnungskenngrößen des Probenmaterials B ist der des Materials A vergleichbar. Die Maximalwerte sind lediglich von -120°C nach -60°C verschoben. Bis zur Temperatur -60°C liegen die Kurvenzüge des Materials B über denen des Probenmaterials A, wobei sich die Meßwertstreuungen beider Materialien überlappen. Der Bruchdehnungswert des Probenmaterials B erfüllt auch bei -180°C noch den in DIN 488 für Raumtemperatur geforderten Mindestwert $A_{10} = 10\%$.

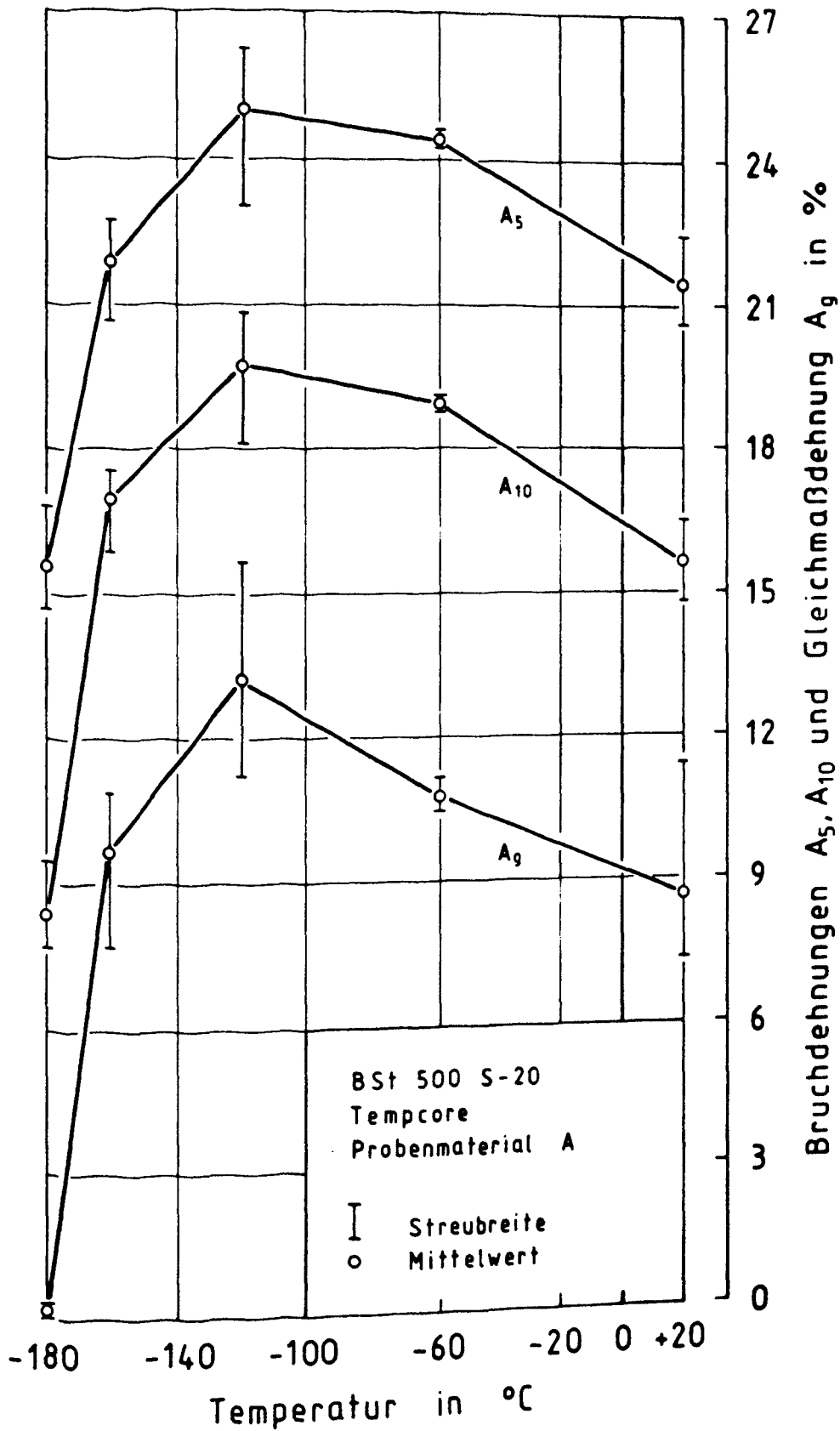


Bild 5.9 Bruchdehnungen und Gleichmaßdehnung für Probenmaterial A in Abhängigkeit von der Temperatur

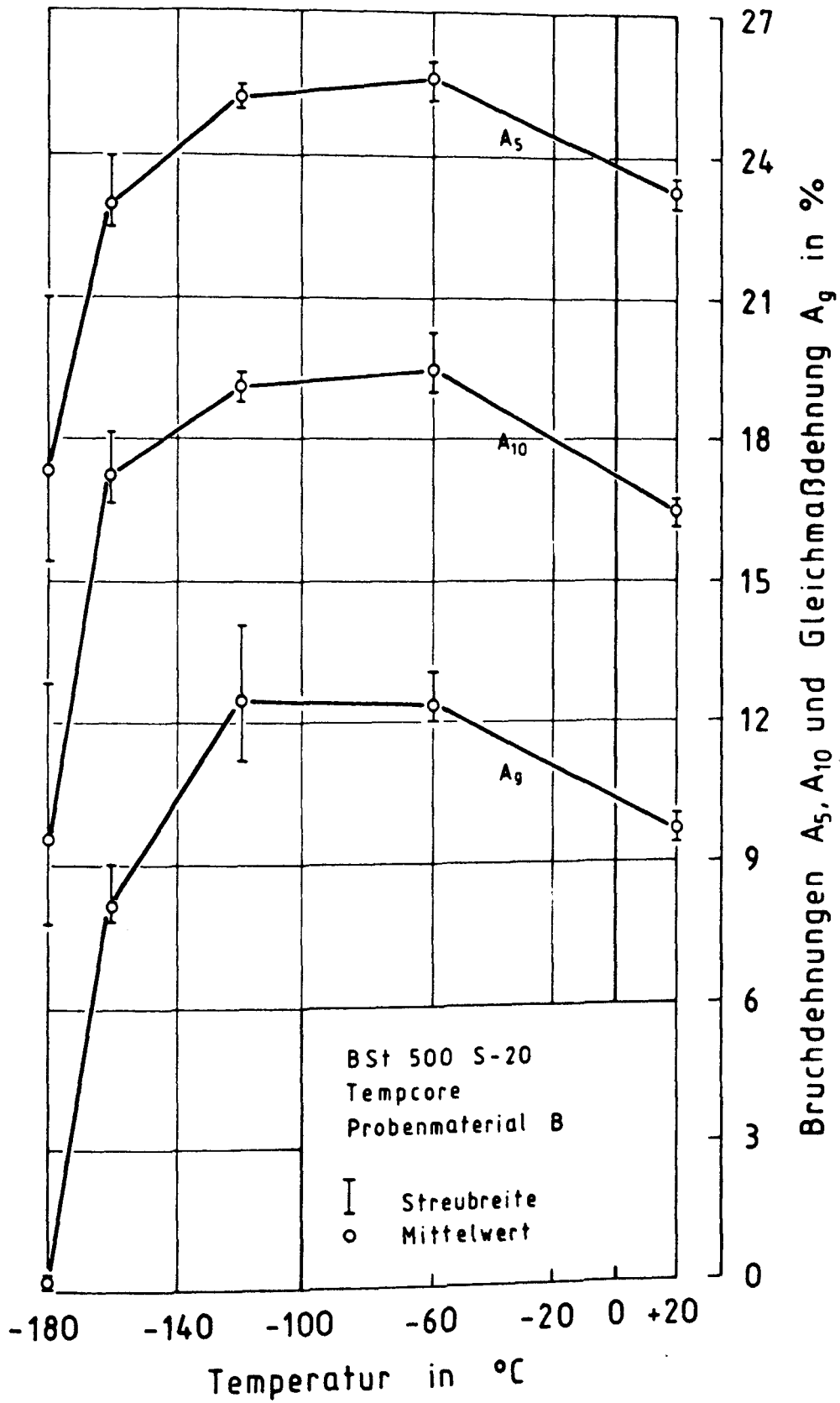


Bild 5.10 Bruchdehnungen und Gleichmaßdehnung für Probenmaterial B in Abhängigkeit von der Temperatur

Eine schlüssige Erklärung für den Anstieg der Dehnungskenngrößen im Temperaturbereich von $+20^{\circ}\text{C}$ bis -120°C steht noch aus.

Bruchdehnung $A_{L=3}$ und Einschnürung Z_L

Bild 5.11 zeigt für das Probenmaterial A einen Abfall der Brucheinschnürung Z_L mit sinkender Temperatur von im Mittel 50% bei $+20^{\circ}\text{C}$ auf 35% bei -180°C . Brucheinschnürungen von $Z_L = 50\%$ lassen im Temperaturbereich bis -60°C ausschließlich auf Gleit- bzw. Wabenbrüche schließen. Im Temperaturbereich -60°C bis -180°C liegen Mischbrüche vor, die sich aus Spalt- und Wabenbruchanteilen zusammensetzen. Ein Steilabfall der Brucheinschnürung, der für die kubisch-raumzentrierten Stähle mit sinkender Temperatur kennzeichnend ist, wird am Probenmaterial A im untersuchten Temperaturbereich nicht beobachtet.

Die Bruchdehnung $A_{L=3}$ zeigt tendenziell denselben Verlauf wie die Brucheinschnürung.

Die Brucheinschnürung des Probenmaterials B weist im untersuchten Temperaturbereich (Bild 5.12) eine vergleichsweise geringe Abnahme auf. Die bei der Prüftemperatur -180°C gemessenen Brucheinschnürungen lagen bei $Z_L = 50\%$. Dieser Kurvenverlauf läßt ausschließlich auf Gleitbrüche schließen.

Auch beim Probenmaterial B korreliert die Bruchdehnung $A_{L=3}$ mit der Brucheinschnürung, während zum Kurvenverlauf von A_5 deutliche Unterschiede bestehen (kein Steilabfall). Dies zeigt, daß die Bruchdehnung $A_{L=3}$ bei einem Probendurchmesser von 20 mm einen guten Anhaltswert für die Brucheinschnürung liefert, deren Bestimmung bei gerippten Betonstählen stark fehlerbehaftet ist.

Um das beobachtete Verformungsverhalten der untersuchten Betonstähle, insbesondere das unterschiedliche Verhalten von Gleichmaßdehnung A_g und Brucheinschnürung Z_L besser darstellen zu können, wird in den Bildern 5.13 bis 5.15 der

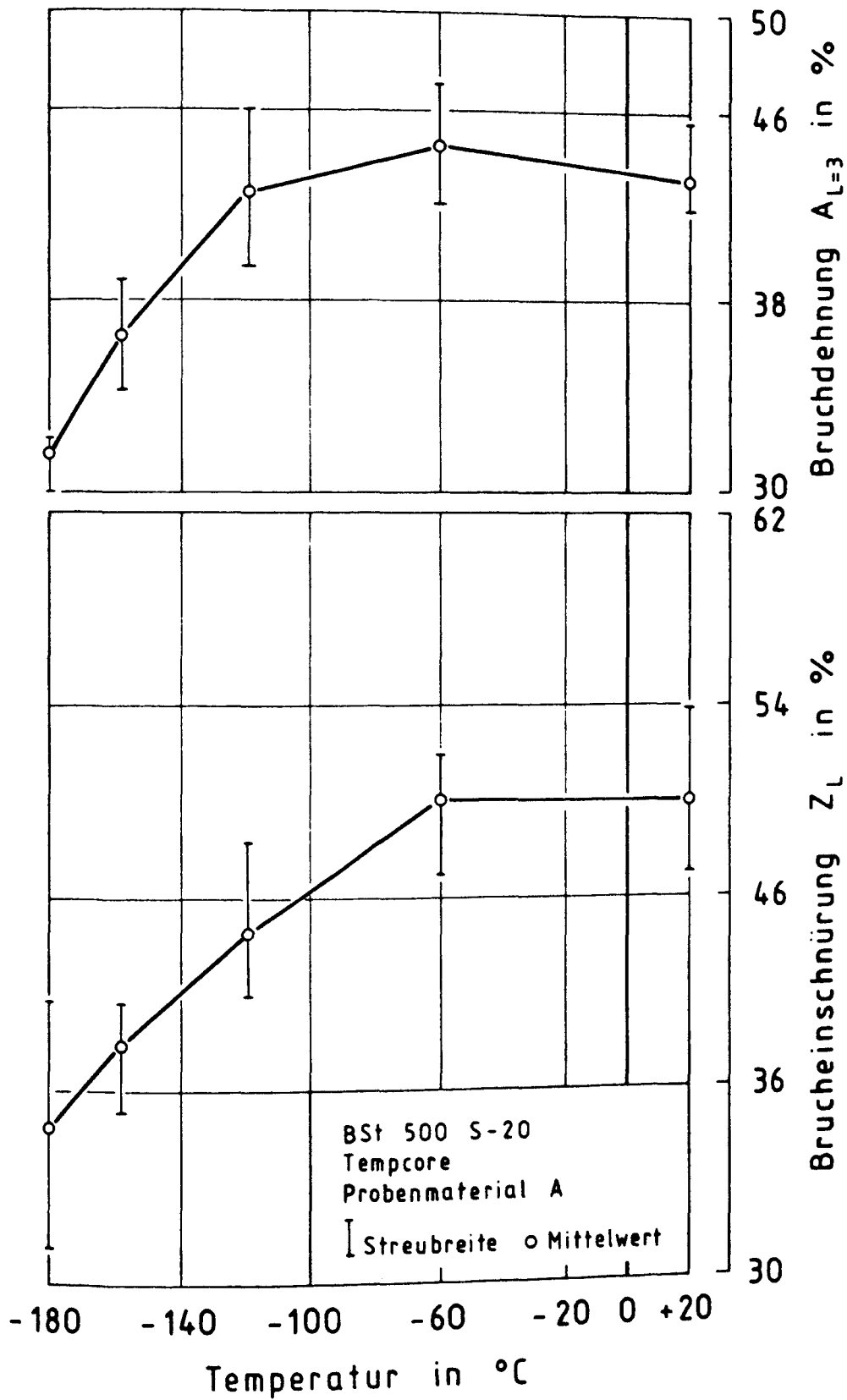


Bild 5.11 Verformungskenngrößen des Probenmaterials A in Abhängigkeit von der Temperatur

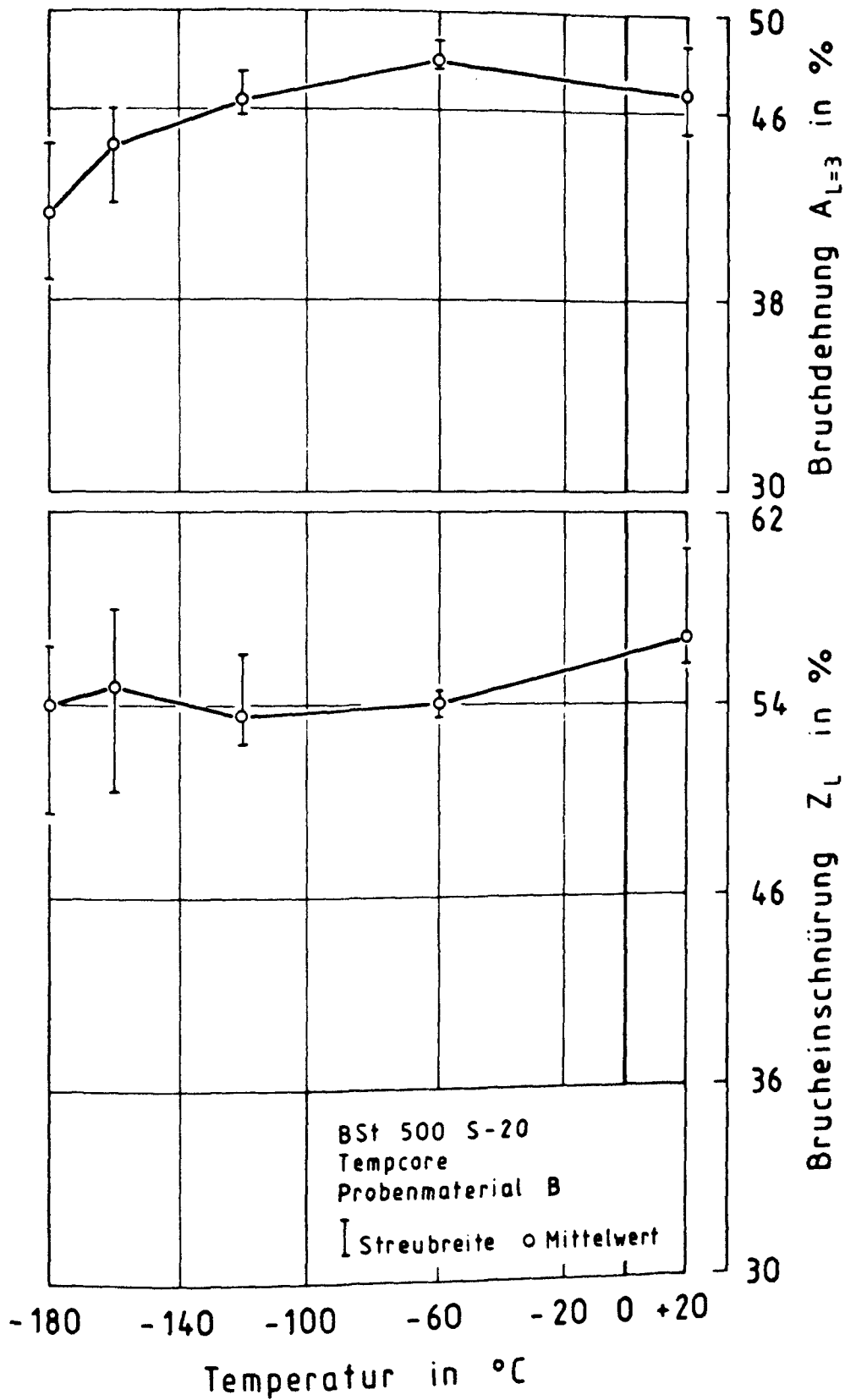


Bild 5.12 Verformungskenngrößen für Probenmaterial B in Abhängigkeit von der Temperatur

differentielle Dehnungsverlauf $\varepsilon(x)$ in der Einschnürzone angegeben. Für beide Probenmaterialien wurden jeweils die Mittelwerte der Gleichmaßdehnung A_g und der Bruchdehnungen $A_{L=3}$, A_5 , A_{10} bei $+20^\circ\text{C}$, -160°C und -180°C ausgewertet.

Der gewählten Darstellung liegen folgende Annahmen zugrunde:

Bruchdehnungen geben die über die im Index angegebene Basislänge gemittelte Dehnung an. Wird vorausgesetzt, daß außerhalb der zu A_{10} gehörenden Basislänge die Dehnung über die Stabachse konstant ist, so gibt A_g die inkrementelle Dehnung außerhalb dieses Bereiches an. Wenn ferner angenommen wird, daß der Bruchquerschnitt in der Mitte der Basislängen der Bruchdehnungen liegt (für Mittelwerte scheint diese Forderung gerechtfertigt), so läßt sich für einzelne Orte der Probenlänge die Verschiebung $\Delta l(x)$ bezüglich des Bruchquerschnitts ($x = 0$) angeben: die Endpunkte der zu den Bruchdehnungen gehörenden Basislängen entfernen sich dann um

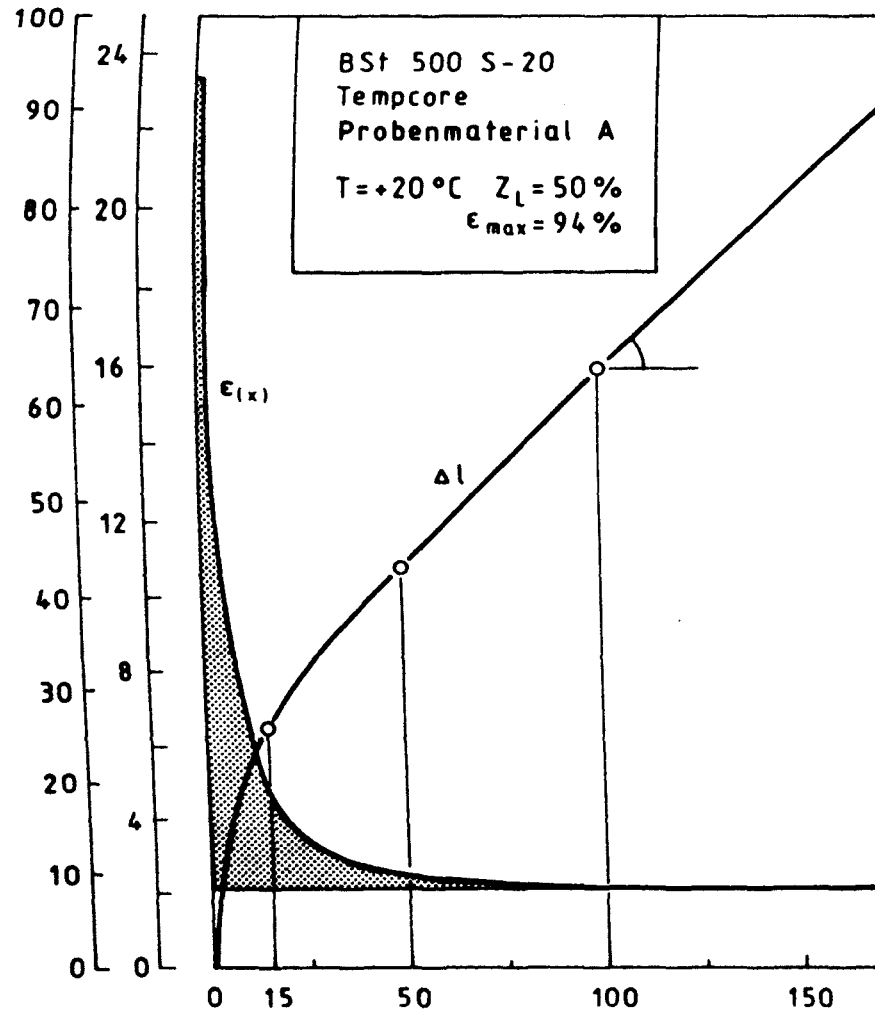
$$\Delta l = \frac{A}{100} \cdot \frac{l_0}{2}$$

vom Nullpunkt. Damit sind für drei Punkte die Werte $\Delta l(x)$ bekannt (aus $A_{L=3}$, A_5 , A_{10}), ferner die Steigung für Werte $x > 100 \text{ mm}$ (aus A_g). Hieraus ist die Funktion $\Delta l(x)$ eindeutig bestimmt und graphisch darstellbar, wenn über die Probenlänge ein homogenes Material vorausgesetzt wird. Aus der graphischen Differentiation von $\Delta l(x)$ (Sekantensteigung) folgt dann $\varepsilon(x)$.

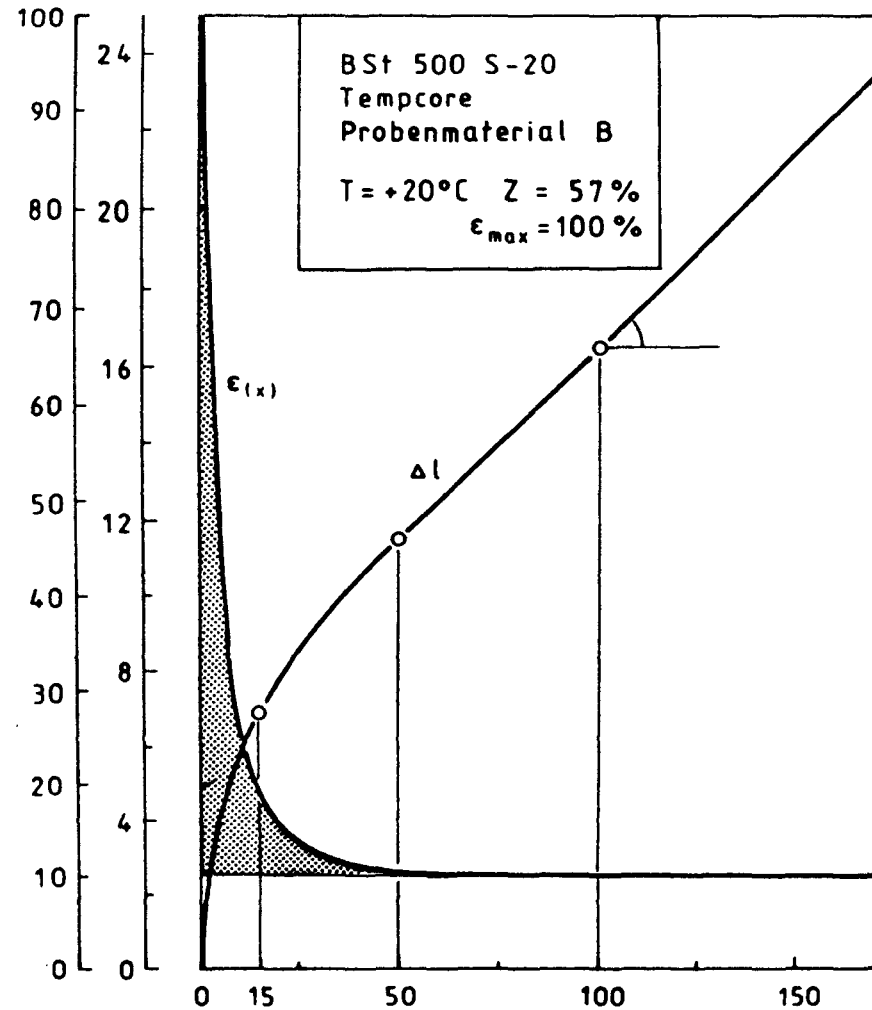
In den Bildern 5.13 bis 5.15 sind die Dehnungsverläufe $\varepsilon(x)$ für beide Materialien für die Temperaturstufen $+20^\circ\text{C}$, -160°C , -180°C angegeben.

Bis -160°C ändert sich das Verformungsverhalten der Einschnürzone nicht wesentlich. Weder zwischen Probenmaterial A und B noch zwischen $+20^\circ\text{C}$ und -160°C sind wesentliche Änderungen erkennbar. Die gemessenen Brucheinschnürungen Z_L korrelieren mit den ermittelten maximalen Dehnungen ε_{max} im Bruchquerschnitt.

$\epsilon(x) [\%]$ $\Delta l [mm]$



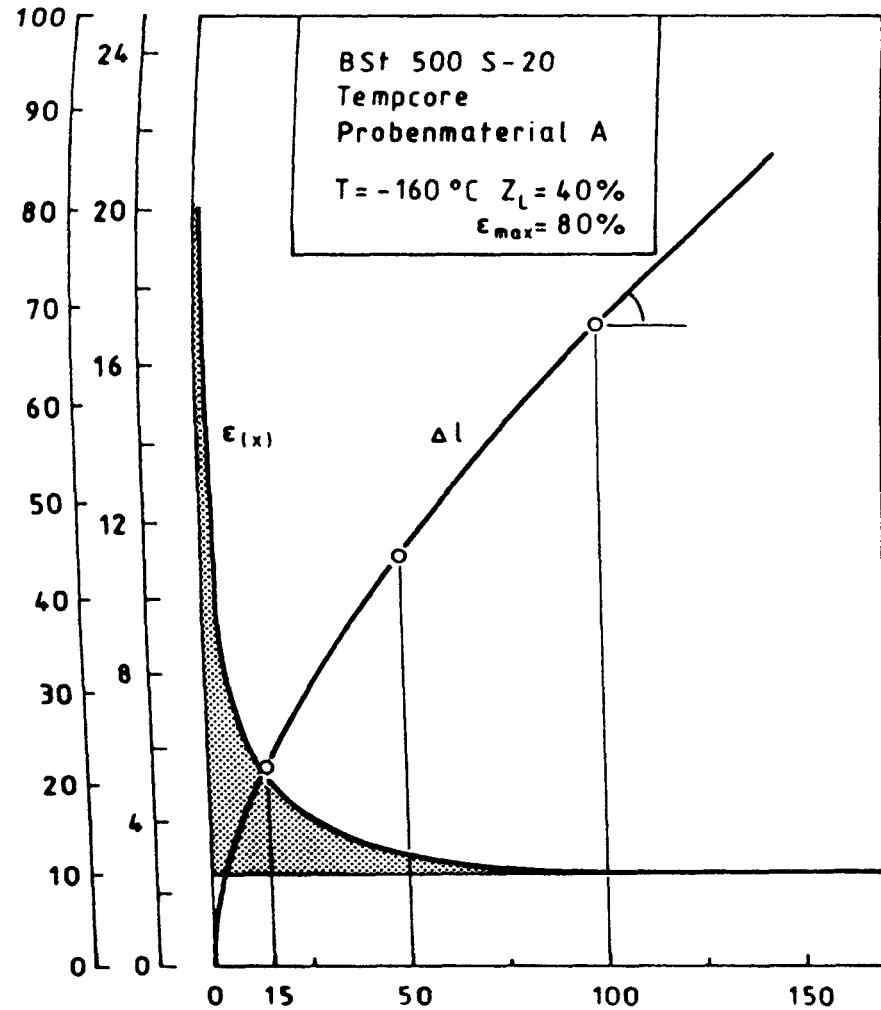
$\epsilon(x) [\%]$ $\Delta l [mm]$



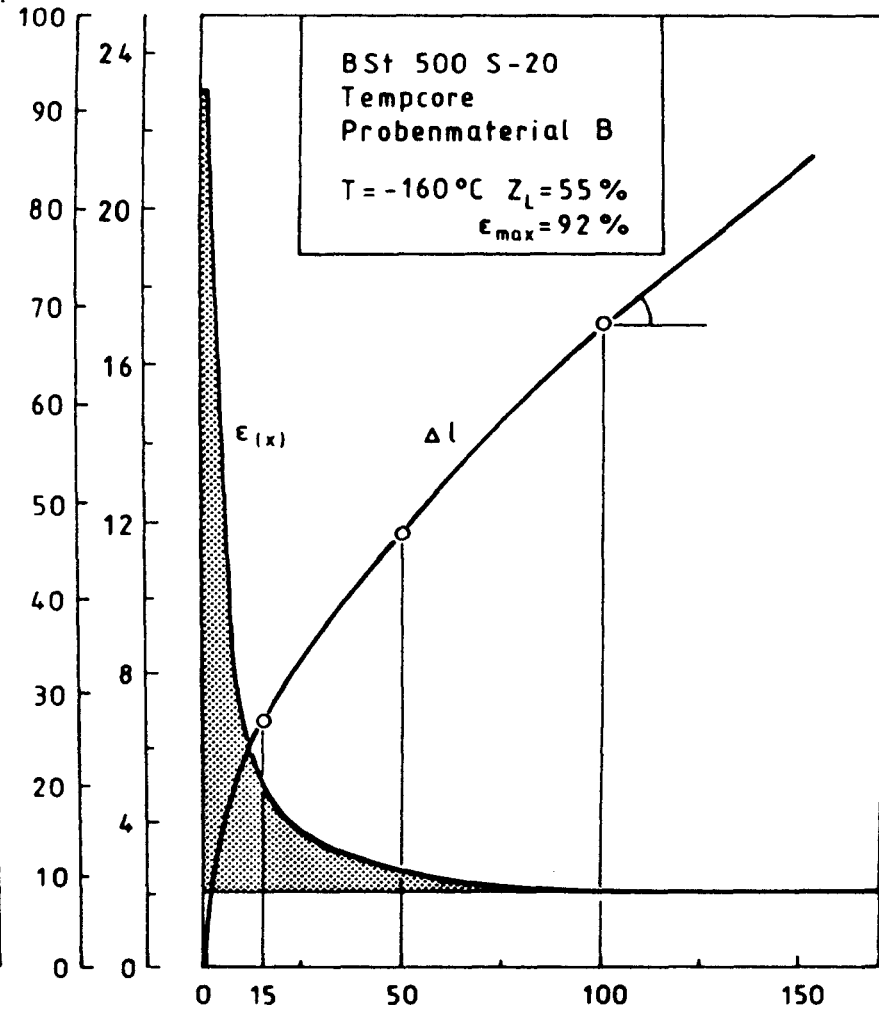
Entfernung x von der Bruchstelle in mm

Bild 5.13 Differentieller Dehnungsverlauf $\epsilon(x)$ im Einschnürbereich bei 20°C für Probenmaterial A und B

$\epsilon(x) [\%]$ $\Delta l [mm]$



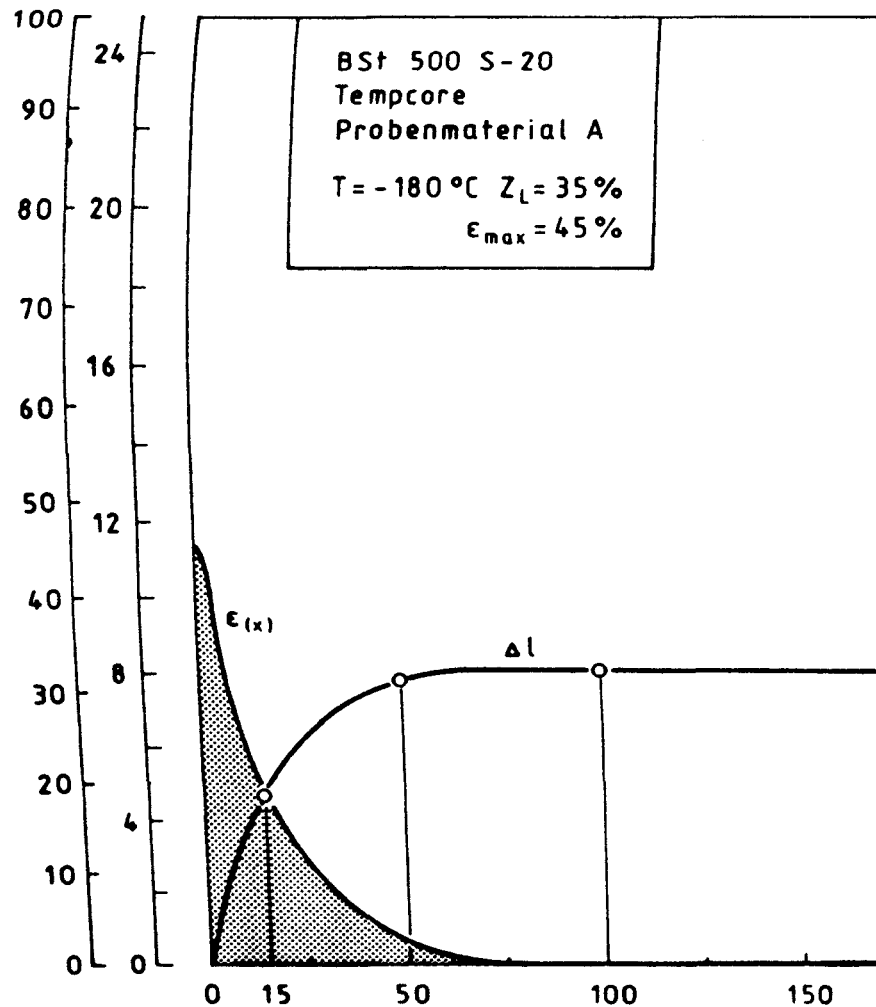
$\epsilon(x) [\%]$ $\Delta l [mm]$



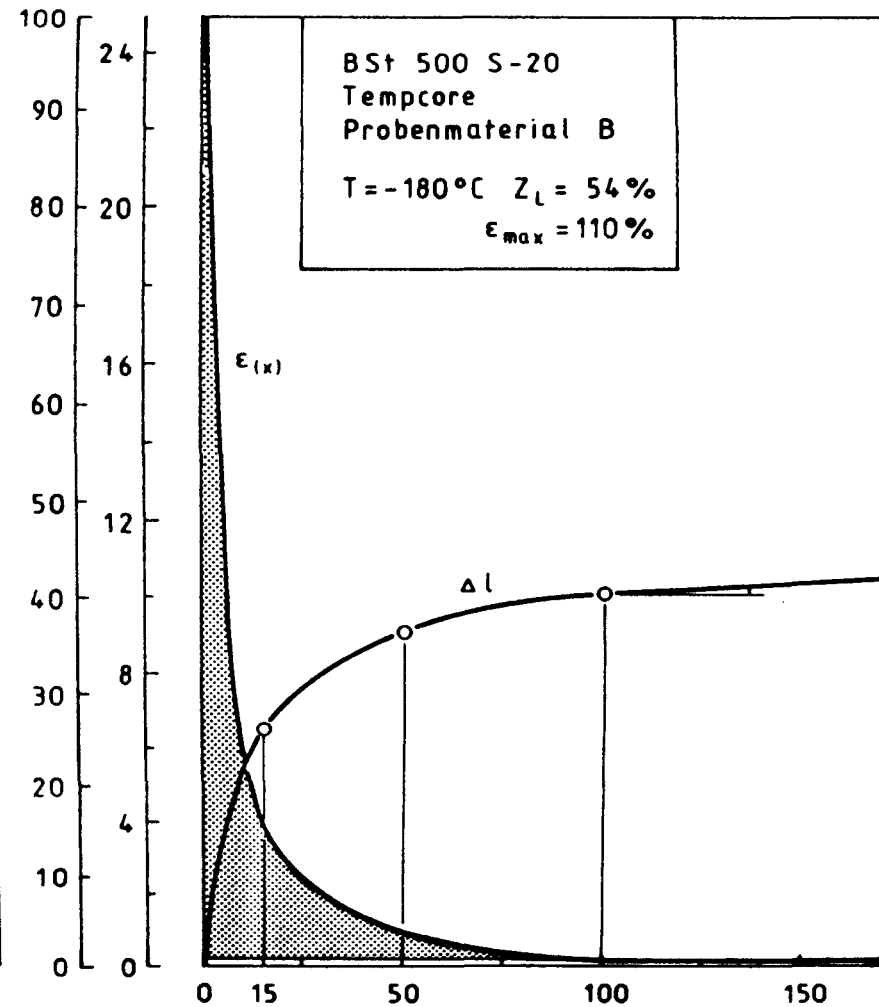
Entfernung x von der Bruchstelle in mm

Bild 5.14 Differentieller Dehnungsverlauf $\epsilon(x)$ im Einschnürbereich bei -160°C für Probenmaterial A und B

$\epsilon(x) [\%]$ $\Delta l [mm]$



$\epsilon(x) [\%]$ $\Delta l [mm]$



Entfernung x von der Bruchstelle in mm

Bild 5.15 Differentieller Dehnungsverlauf $\epsilon(x)$ im Einschnürbereich bei -180°C für Probenmaterial A und B

Bei der Temperaturstufe -180°C verändert sich das Verformungsverhalten grundlegend, sowohl gegenüber der Temperaturstufe -160°C bei gleichem Material als auch im Vergleich beider Materialien.

Beiden Materialien gemeinsam ist der extreme Abfall der Gleichmaßdehnung. Dies deutet darauf hin, daß die Ausbreitung von Lüdersbändern über die gesamte Probenlänge nicht stattfindet. Das aber steht im Einklang mit den im Abschnitt 5.5.1 beschriebenen Bruchmechanismen.

Die Größe der gemessenen mittleren Brucheinschnürung $Z_L = 54\%$ bei -180°C für das Probenmaterial B, die mit der ermittelten maximalen Dehnung $\epsilon_{\max} = 110\%$ korreliert, weist bei diesem Material auf die auch bei dieser Temperaturstufe unverminderte Plastizität hin. Beim Probenmaterial A wird zusätzlich zum Abfall der Gleichmaßdehnung auch die Verminderung der Brucheinschnürung beobachtet.

Empfindlichkeit der Probenmaterialien gegenüber Oberflächenschädigungen

Bei der Durchführung der Feindehnungsmessungen am Probenmaterial A sind infolge der Nebenwirkung durch die eingedrückten Meßschneiden des angeklemmten Verlängerungsmeßsystems vorzeitige Probenbrüche aufgetreten. Diese Probenbrüche traten nach Überschreiten der oberen Streckgrenze auf. Dieser Sachverhalt weist auf die schon in den Abschnitten 3. und 5.5.1 erwähnte Empfindlichkeit der Tempcore-Stähle gegenüber Oberflächenschädigungen hin.

5.5.3 Festigkeitskenngrößen

E-Modul

Der E-Modul steigt bei beiden Materialien mit sinkender Temperatur stetig an (Bild 5.16).

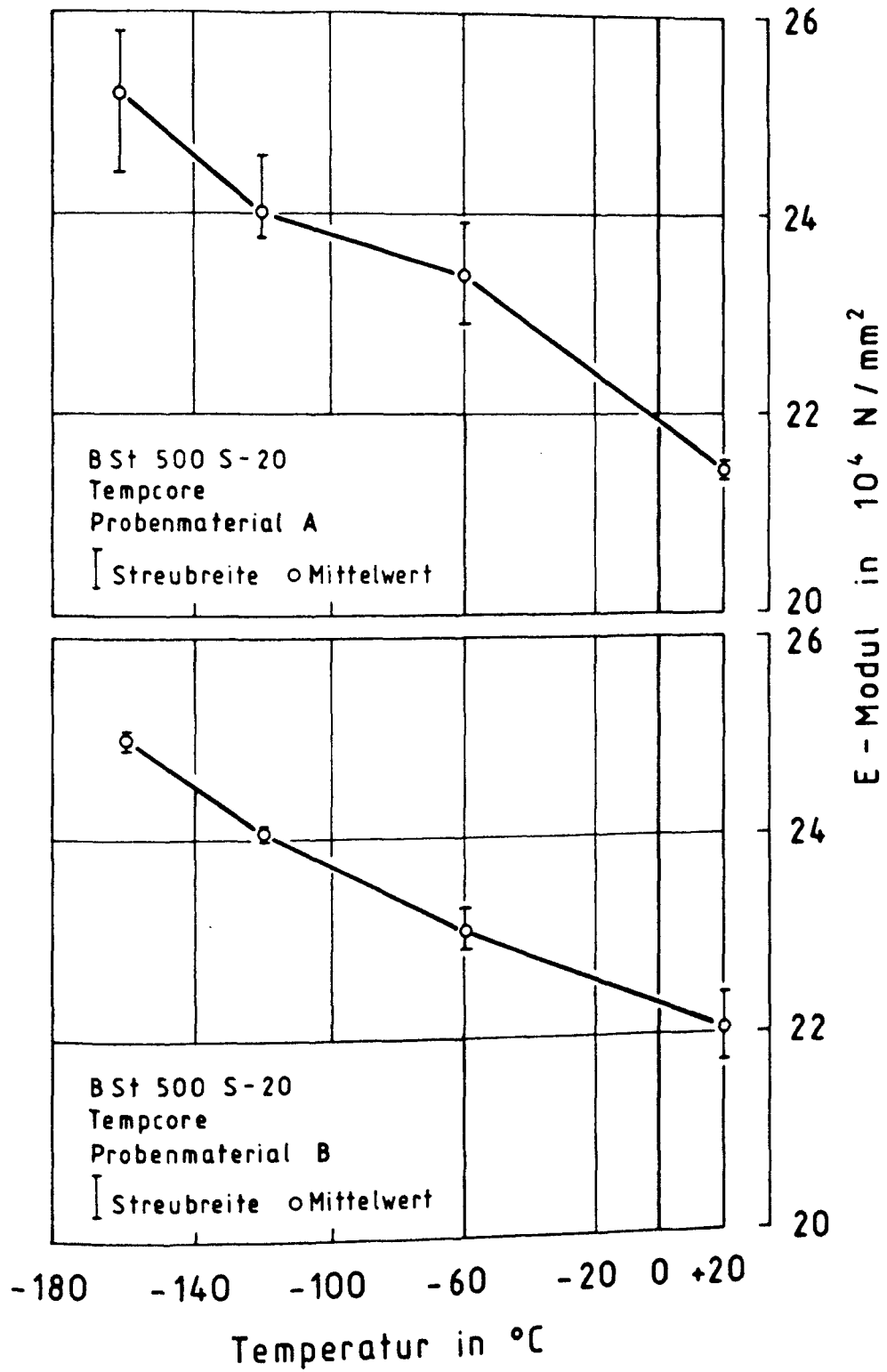


Bild 5.16 Elastizitätsmodul für Probenmaterial A und B in Abhängigkeit von der Temperatur

Bei -160°C beträgt die Zunahme des E-Moduls gegenüber $+20^{\circ}\text{C}$ beim Probenmaterial B 14%, beim Probenmaterial A 18%.

Bei -180°C wurden wegen des bei Erreichen der oberen Streckgrenze eintretenden Probenbruches keine Feindehnungsmessungen durchgeführt.

0,01%-Dehngrenze $R_{p0,01}$ und obere Streckgrenze R_{eH}

Bei beiden Materialien zeigt sowohl die 0,01%-Dehngrenze als auch die obere Streckgrenze mit sinkender Temperatur einen zunehmenden Anstieg (Bild 5.17 und 5.18).

Für -180°C liegen wegen fehlender Feindehnungsmessungen keine Werte für $R_{p0,01}$ vor. Für die obere Streckgrenze wurden sowohl Maschinendiagramme als auch Feindehnungsmessungen ausgewertet. Die Kurvenzüge beider Kenngrößen verlaufen bei beiden Materialien im untersuchten Temperaturbereich nahezu parallel.

Obere Streckgrenze R_{eH} und Zugfestigkeit R_M bzw. R_M^-

Bei beiden Materialien zeigt die Zugfestigkeit R_M ebenso wie die obere Streckgrenze R_{eH} mit sinkender Temperatur einen zunehmenden Anstieg. Die obere Streckgrenze weist jedoch einen steileren Anstieg auf und mündet bei -160°C bzw. -180°C schließlich im Kurvenzug R_M . Dieses Verhalten wird durch die Maschinendiagramme (Bild 5.4 und 5.5) belegt, wobei allerdings das unterschiedliche Materialverhalten bei -160°C und -180°C durch die normierten Kenngrößen R_{eH} und R_M nicht wiedergegeben wird. Obwohl bei beiden Prüftemperaturen die Höchstzugkraft und die obere Streckgrenzenkraft jeweils auf gleichem Niveau liegen, entsprechen beide Werte bei -160°C jedoch verschiedenen Verformungszuständen. Demgegenüber ist die Zugfestigkeit und die obere Streckgrenze bei -180°C einem identischen Verformungszustand zuzuordnen.

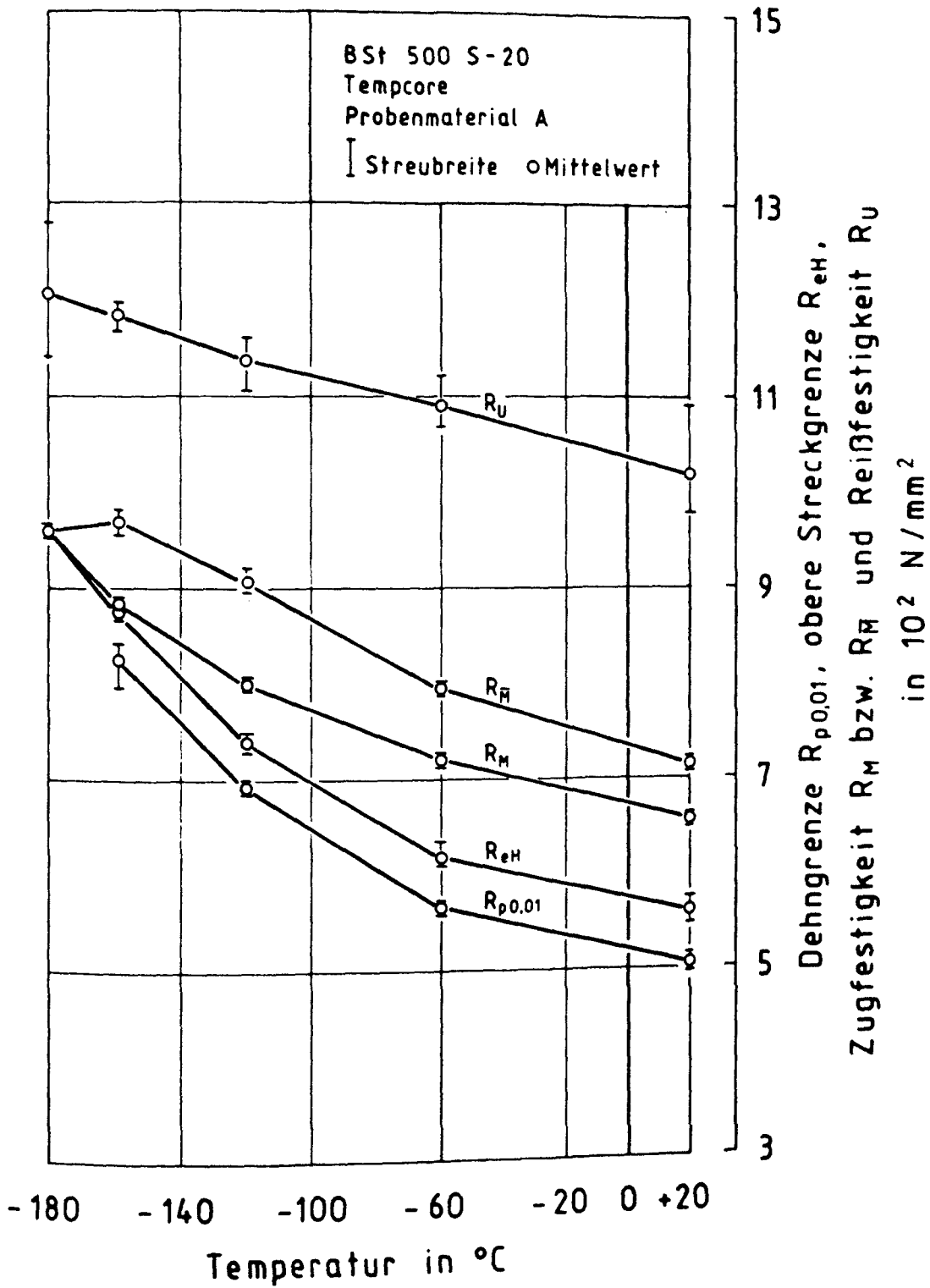


Bild 5.17 Dehngrenze, Streckgrenze und Festigkeit für Probenmaterial A in Abhängigkeit von der Temperatur

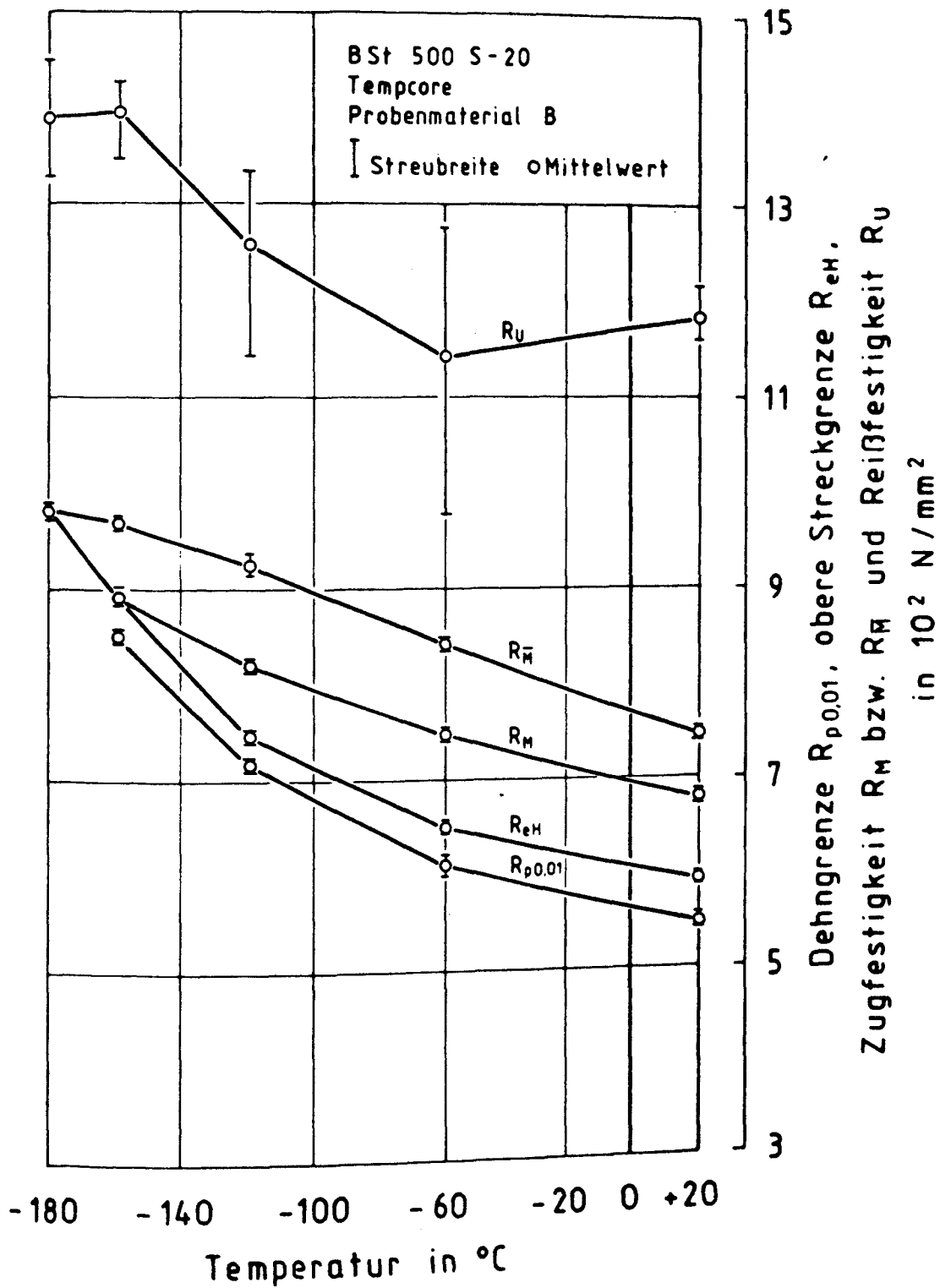


Bild 5.18 Dehngrenze, Streckgrenze und Festigkeit für Probenmaterial B in Abhängigkeit von der Temperatur

Wegen der Veränderung des zur jeweiligen Höchstzugkraft gehörenden wahren Probenquerschnitts, der mit der Gleichmaßdehnung korreliert, wurde die "wahre Zugfestigkeit R_M " eingeführt. Die Ableitung der wahren Zugfestigkeit R_M aus den bekannten technologischen Kenngrößen R_M und A_g ist in Abschnitt 4.7.5 angegeben. In der Differenz der beiden Kurvenverläufe von R_M und R_M spiegelt sich qualitativ der Verlauf der Gleichmaßdehnung wieder. Hierbei wird der zunehmende Anstieg von R_M mit sinkenden Temperaturen teilweise durch die Temperaturabhängigkeit der Gleichmaßdehnung ausgeglichen.

Obere Streckgrenze R_{eH} und Reißfestigkeit R_U

Ein Steilabfall der Reißfestigkeit R_U als Kennzeichen des Wechsels der Bruchmechanismen am duktil-spröden Übergang (siehe Bild 3.1) wird bei beiden Materialien im untersuchten Temperaturbereich nicht beobachtet. Die Reißfestigkeit steigt bei sinkenden Temperaturen an. Besonders auffällig ist die große Streuung der Reißfestigkeit. Eine Annäherung der Kurvenzüge von R_U und R_{eH} mit abnehmender Temperatur ist deutlich erkennbar.

5.6 Ergebnisse der Bruchuntersuchungen

In den Anlagen 5.5 bis 5.22 sind die makroskopischen Übersichtsaufnahmen sowie REM-Aufnahmen von ausgewählten Bruchufern zusammengestellt.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden stets die gleichen Bildvergrößerungen gewählt.

5.6.1 Fraktographische Untersuchungen des Probenmaterials A

- Bei +20°C zeigt die Makrostruktur der Bruchufer eine stark zerklüftete Bruchfläche (Anlage 5.5), die überwiegend in Richtung der größten Schubspannung (Schubspannungsbruch) angeordnet ist. Die REM-Aufnahmen erfassen einen Bereich

der unter einem Winkel von 45° stehenden Bruchfläche. Erkennbar ist die transkristalline Wabenstruktur des Bruchufers (Anlage 5.5 und 5.6).

- Bei -60°C (Anlage 5.7) zeigt das Bruchufer makroskopisch eine nahezu ebene Bruchfläche. Die Bruchausgangsstelle liegt ca. 2 mm vom Probenrand entfernt, wie die Bruchverlaufslinien erkennen lassen. Damit ist der Bruch möglicherweise vom inneren Rand der martensitischen Randzone ausgegangen. Die Bruchufer zeigen als mikroskopisches Merkmal Wabenstruktur mit vereinzelt Spaltflächen auf. (Anlage 5.8).

- Bei -120°C erfolgte der Bruch makroskopisch senkrecht zur größten Normalspannung (Normalspannungsbruch). Eine Bruchausgangsstelle in Probenrandnähe war auch unter dem Mikroskop nicht erkennbar (Anlage 5.9). Gegenüber der Prüftemperatur -60°C zeigen die Bruchufer bei -120°C bereits überwiegend Spaltflächen, die von vereinzelt Wabenbruchsäumen umgeben werden (Anlage 5.10). Es hat ein Wechsel des dominierenden Bruchmechanismus - vom transkristallinen Gleit- oder Wabenbruch zum transkristallinen Trennbruch (Spaltbruch) - stattgefunden. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen für die Brucheinschnürung.

- Bei -160°C lag die Bruchausgangsstelle dieser Zugprobe sehr nahe am Probenrand (Anlage 5.11). Im mikrofraktographischen Bild der Bruchufer sind Spaltflächen mit vereinzelt Wabenbruchanteilen zu erkennen (Anlage 5.12).

- Auch bei der Prüftemperatur -180°C lag die Bruchausgangsstelle am Probenrand (Anlage 5.13). Die mikrofraktographischen Merkmale sind vergleichbar denen bei -160°C (Anlage 5.14). Jedoch hat die Zahl der in Richtung der Hauptspannung verlaufenden Nebenrisse zugenommen.

Die mikrofraktographischen Bruchmerkmale der Betonstahlzugproben weisen den zunehmenden Anteil des Spaltbruches an der instabilen Rißausbreitung mit sinkender Temperatur im Prüftemperaturbereich von -60°C bis -180°C nach, woraus im

Mittel eine Abnahme der Brucheinschnürung von 50% auf 35% resultiert.

Im übrigen waren an keiner geprüften Zugprobe, bei der die Bruchausgangsstelle rasterelektronenmikroskopisch in der Einschnürzone am Probenrand festgestellt wurde, mechanische Oberflächenbeschädigungen des Betonstahls als Ursache für die Rißentstehung nachzuweisen.

5.6.2 Fraktographische Untersuchung des Probenmaterials B

- Bei +20°C zeigt die makroskopische Aufnahme eine stark zerklüftete Bruchfläche (Anlage 5.15). Die mikrofraktographischen Aufnahmen zeigen eine reine Wabenstruktur mit stark ausgezogenen Kämmen (Anlage 5.16).

- Bei -120°C zeigen die makroskopischen Bruchmerkmale eine ebene Normalspannungsbruchfläche mit Fräserbruchanteilen im Randbereich (Anlage 5.17). Der Bruchausgang liegt in der Probenmitte. Die Ursache des fräserförmigen Bruches ist die Größe der in tangentialer Richtung infolge des dreiachsigen Spannungszustandes im Einschnürbereich auftretenden Zugkräfte, die eine radiale Rißbildung bewirken /11/. Die Flächenlage des Fräserbruches am Zugprobenbruchufer entspricht annähernd dem angelassenen martensitischen Randgefüge (Anlage 5.18). Die mikrofraktographischen Bruchmerkmale bei dieser Prüftemperatur zeigen keine signifikanten Unterschiede zur Wabenstruktur bei der Prüftemperatur +20°C.

Das größere plastische Formänderungsvermögen des Probenmaterials B (Bild 5.12) im Vergleich zum Material A (Bild 5.11) bei -120°C erklärt sich aus den unterschiedlichen wirksamen Bruchmechanismen beider Materialien bei dieser Prüftemperatur, worauf die unterschiedlichen mikrofraktographischen Bruchmerkmale schließen lassen.

- Bei -160°C zeigt die makroskopische Aufnahme eine ausgeprägte Randzone mit Fräserbruch. Der Bruchausgang liegt in der Mitte des engsten Probenquerschnitts (Einschnürzone) (Anlage 5.19). Die mikroskopischen Bruchmerkmale zeigen eine Bruchfläche mit Wabenstruktur und vereinzelt Spaltflächen, dabei ist die Bruchfläche von Nebenrissen durchsetzt (Anlage 5.20).

- Bei -180°C zeigen die makroskopischen Bruchmerkmale keine signifikanten Unterschiede zu denen bei -160°C (Anlage 5.21). Die mikroskopischen Bruchmerkmale bestehen aus der vorherrschenden Wabenstruktur und einem geringen Anteil an Spaltflächen (Anlage 5.22).

Die makroskopischen Bruchmerkmale des Probenmaterials B sind bei allen Prüftemperaturen ein zentrischer Bruchausgang in der Einschnürzone und ein Fräserbruchanteil am Probenrand. Die mikroskopischen Bruchmerkmale gegenüber dem Probenmaterial A sind Waben, die nach einer deutlich erhöhten plastischen Verformung der Werkstoffbrücken zwischen den Hohlräumen auftraten. Die ersten Spaltflächen wurden an den Bruchufern der bei -160°C geprüften Proben gefunden, was auf einen Übergang vom reinen Gleit- oder Wabenbruch zum Mischbruch hinweist.

Die Ergebnisse der Bruchuntersuchungen stehen in Übereinstimmung mit der ermittelten Temperaturabhängigkeit der Verformungskenngrößen beider Probenmaterialien (Abschnitt 5.5.2).

6. Zusammenfassung

Im Hinblick auf eine Eignung für den Bau von Flüssiggasbehältern wurden nach dem Tempcore-Verfahren hergestellte Betonstähle BSt 500 S - 20 zweier Hersteller untersucht.

Das Kernstück des Untersuchungsprogrammes bildeten quasi-statische Zugversuche an ungekerbten Betonstahlproben im Temperaturbereich von $+20^{\circ}\text{C}$ bis -180°C . Diese Zugversuche wurden durch Untersuchungen der makroskopischen und mikroskopischen Bruchmerkmale repräsentativer Zugproben ergänzt. Ferner wurde durch dilatometrische Messungen der Verlauf der mittleren Temperaturdehnung bestimmt. Kleinlast-Härtemessungen und die Analyse des Gefügebauwerks beider Versuchsmaterialien rundeten die Untersuchungen ab.

Die Untersuchungen haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

- Die untersuchten Betonstähle zeigen einen unterschiedlichen Gefügebau.
- Die untersuchten Betonstähle zeigen eine stetige Zunahme der Festigkeitskenngrößen mit abnehmender Temperatur.
- Die untersuchten Betonstähle zeigen zunächst bei abnehmender Temperatur bis ca. -100°C bzw. -120°C eine Zunahme der Dehnungskenngrößen.
- Die untersuchten Betonstähle versagen im Zugversuch bei -180°C nach dem Überschreiten der oberen Streckgrenze mit einem stetigen Kraftabfall, so daß nur eine sehr niedrige Gleichmaßdehnung erreicht wird.
- Zwischen -160°C und -180°C tritt bei den untersuchten Betonstählen ein Steilabfall der Gleichmaßdehnung A_g von i.M. 9% bei -160°C auf Werte kleiner 1% bei -180°C ein.
- Zwischen -160°C und -180°C tritt bei den untersuchten Betonstählen ein Steilabfall der Bruchdehnungen A_5 und A_{10} ein. Bis -160°C liegen die gemessenen Bruchdehnungswerte oberhalb der entsprechenden Raumtemperatur-Werte.

- Die untersuchten Betonstähle zeigen hinsichtlich der Brucheinschnürung ein deutlich unterschiedliches Verhalten. Beim Probenmaterial A sinkt die Brucheinschnürung zwischen -60°C und -180°C von 50% auf 35%, während das Probenmaterial B im untersuchten Temperaturbereich zwischen $+20^{\circ}\text{C}$ und -180°C einen quasi-konstanten Brucheinschnürungswert von 54% aufweist.
- Die fraktographischen Untersuchungen der Betonstähle führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. So zeigen die mikrofraktographischen Bruchmerkmale des Probenmaterials A bei ca. -60°C den Übergang vom Gleitbruch zum Mischbruch an. Mit weiter abnehmender Temperatur nimmt der Anteil des Spaltbruches an der instabilen Rißausbreitung im Prüftemperaturbereich von ca. -60°C bis -180°C zu. Beim Probenmaterial B hingegen erfolgt bei ca. -160°C der Übergang vom Gleit- und Wabenbruch zum Mischbruch.
- Aus Beobachtungen bei den Zugversuchen und bei den fraktographischen Untersuchungen ergeben sich Hinweise auf eine erhöhte Kerbempfindlichkeit des Probenmaterials A bei tiefen Temperaturen.

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse ist die Gleichmaßdehnung A_g für die Beurteilung der Tieftemperatureignung der untersuchten Betonstähle maßgebend, obwohl die Gleichmaßdehnung kein Maß für die Zähigkeit der Betonstähle ist. So zeigt ein vorverformter Betonstahl (Beispiel: nach konstruktiven Erfordernissen gebogene Stäbe) im Versagensfall eine verminderte Gleichmaß- und Bruchdehnung, aber eine unveränderte Einschnürung und ein unverändertes mikroskopisches Verformungsvermögen. Gleichwohl zeigen die Untersuchungsergebnisse, daß die Gleichmaßdehnung infolge des signifikanten Steilabfalls und der absoluten Größe der bei -180°C erreichten Werte im Hinblick auf eine makroskopische Verformung im Falle des plastischen Bauteilkollapses die maßgebende Kenngröße ist.

Danach sind die untersuchten, nicht vorverformten Betonstähle unter den Beanspruchungsbedingungen des Zugversuchs für Betriebstemperaturen bis etwa -160°C geeignet.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß im Hinblick auf den anwendungsorientierten Einsatz ferritischer Betonstähle bei tiefen Betriebstemperaturen die Informationen und Kenngrößen des Zugversuchs

- Kraft-Verlängerungs-Kurve
- Fließgrenze bzw. Streckgrenze
- Zugfestigkeit
- Gleichmaßdehnung
- Bruchdehnung
- Brucheinschnürung

und der makroskopischen und mikroskopischen Bruchuntersuchungen für die Beurteilung des temperaturabhängigen Spröbruchverhaltens dieser Stähle erforderlich sind.

Wegen der verfahrenstechnisch bedingten Streuung der Eigenschaften von Materialien verschiedener Hersteller sind im Einzelfall umfangreiche Eignungsnachweise für den Einsatz im Tieftemperaturbereich erforderlich. Die Verfasser empfehlen folgenden Untersuchungsumfang:

- Quasi-statische Zugversuche bei Raumtemperatur und bei der angestrebten Betriebstemperatur zur Ermittlung der Festigkeitskenngrößen und der Verformungskenngrößen (Gleichmaßdehnung, Bruchdehnung und Brucheinschnürung Z_L nach dem vorgestellten Verfahren) an nicht vorverformten ("jungfräulichen") und vorverformten Betonstahlzugproben. Darüber hinaus sind beide Verformungszustände noch durch die Prüfung ungekerbter und gekerbter Zugproben zu differenzieren.

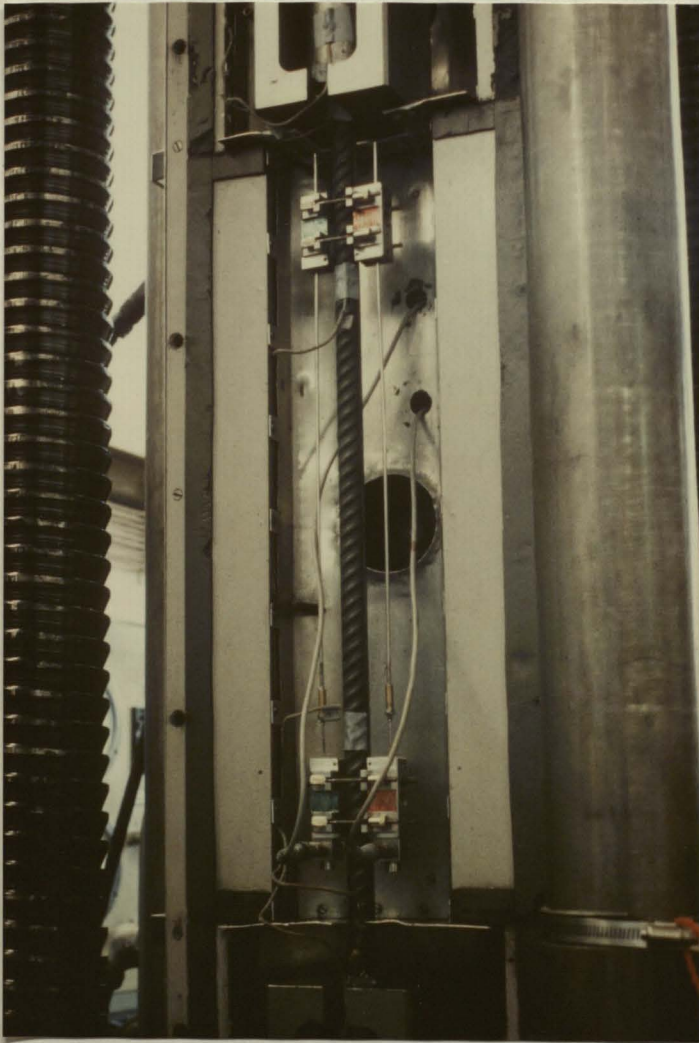
- Chemische Analyse des Stahls zur Beurteilung seiner Mikrostruktur.
- Makro- und mikrofraktographische Untersuchungen zum Feststellen der wirksamen Bruchmechanismen im Betonstahl.
- Anfertigen von metallographischen Schliffbildern zur Beschreibung des Gefügebraufbaus.

7. Literaturverzeichnis

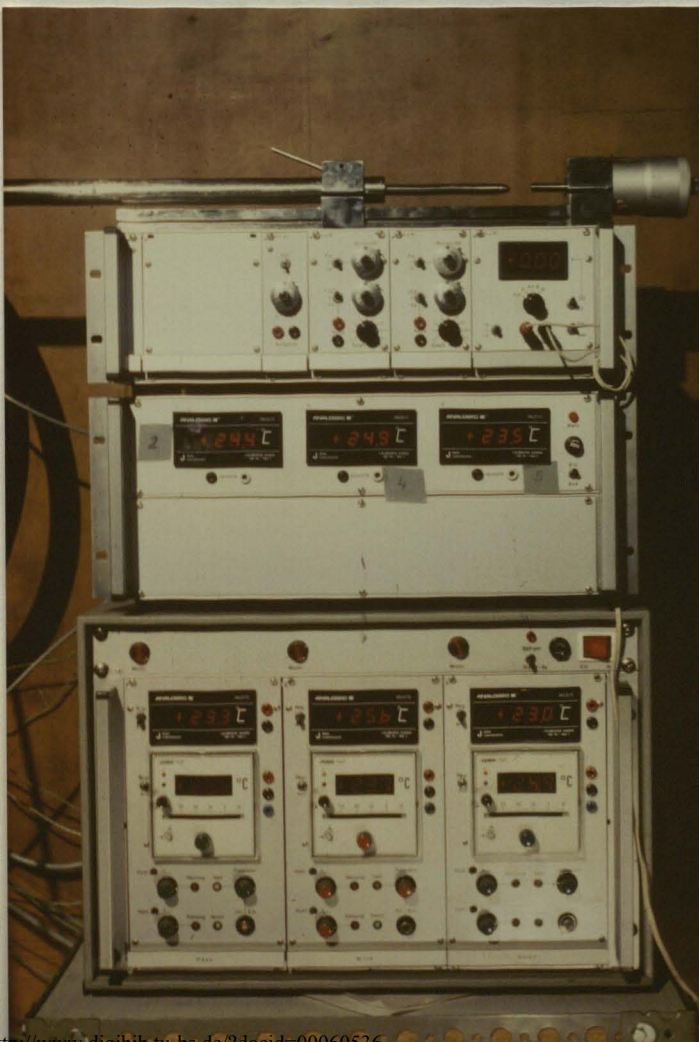
- /1/ Sturzenegger, E.
Lagerung und Verteilung von Flüssiggas
3 R international 20, (1981) 12
- /2/ Zerna, W.
Tanks für kryogene Flüssigkeiten
Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften
Vorträge N 305, Westdeutscher Verlag, 1981
- /3/ Brüggeling, A.S.G.
Prestressed Concrete for the Storage of Liquefied
Gases
Viewpoint Publication, Cement and Concrete
Association, London, 1981
- /4/ FIP-Publication:
Preliminary Recommendations for the Design of
Prestressed Concrete Containment Structures for the
Storage of Refrigerated Liquefied Gases
Guide to Good Practice, 1982
- /5/ Beck, H.
Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften von Walzdraht
und Stabstahl durch Wärmebehandlung aus der Walzhitze
Stahl und Eisen 101, Heft 8/81
- /6/ Nilles, P.
Erörterungsbeitrag zu /5/
Stahl und Eisen 101, Heft 8/81
- /7/ Economopoulos, M.; Respen, Y.; Lessel, G.; Steffens,
G.
Application of the Tempcore Process to the Fabrication
of High Yield Strength Concrete-Reinforcing Bars
C.R.M. No.45, 1975
- /8/ Rostásy, F.S.
Stahlbeton- und Spannbetonbehälter zur Lagerung
tiefkalter, verflüssigter Erdgase - Prüf- und
Auswahlkriterien für Baustoffe
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz,
Technische Universität Braunschweig
Forschungsbericht, 1986

- /9/ Adams, M.A.J.
Selection of Steels for Reinforcement and Prestressing
of Concrete at Cryogenic Temperature
Taylor Woodrow Research Laboratories
- /10/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.; Wiedemann, G.
Verhalten von Spann- und Bewehrungsstahl bei tiefen
Temperaturen
Betonwerk und Fertigteiltechnik, Heft 2/82, Heft 3/82
- /11/ Erdmann, J.; Neisecke, J.; Rostásy, F.S.
Festigkeits- und Verformungsverhalten von Spannstählen
im Bereich tiefer Temperaturen von 0°C bis -180°C
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz,
Technische Universität Braunschweig,
Forschungsbericht, 1987
- /12/ Erdmann, J.; Landwehrs, K.; Neisecke, J.; Rostásy,
F.S.
Tieftemperatur-Prüftechnologie für Bewehrungs- und
Spannstähle sowie Beton im Tieftemperaturbereich +20°C
bis -180°C
Betonwerk und Fertigteiltechnik, Heft 1/83, Heft 2/83
- /13/ Schneeweiß, G.
Festlegung von Übergangstemperaturen für den
Zugversuch anhand der Brucheinschnürung und deren
Abhängigkeit von Kenngröße und Kohlenstoffgehalt
Material und Technik, Heft 3/79
- /14/ Schneeweiß, G.
Beitrag zur Temperaturabhängigkeit der Reißfestigkeit
und zum Korngrößeneinfluß
Material und Technik, Heft 1/81
- /15/ Dahl, W.; Rees, H.
Die Spannungs- und Dehnungskurve von Stahl
Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, 1976
- /16/ Hartl, G.
Das Verhalten von Betonrippenstählen unter sehr tiefen
Temperaturen
Beton- und Stahlbetonbau, Heft 10/85, Heft 11/85
- /17/ Bernard, A.; Lessel, G.
Mechanical Properties of Concrete Reinforcing Bars
Used for Liquefied Gas Storage Tanks
Arbed S.A., Research Department, 1983

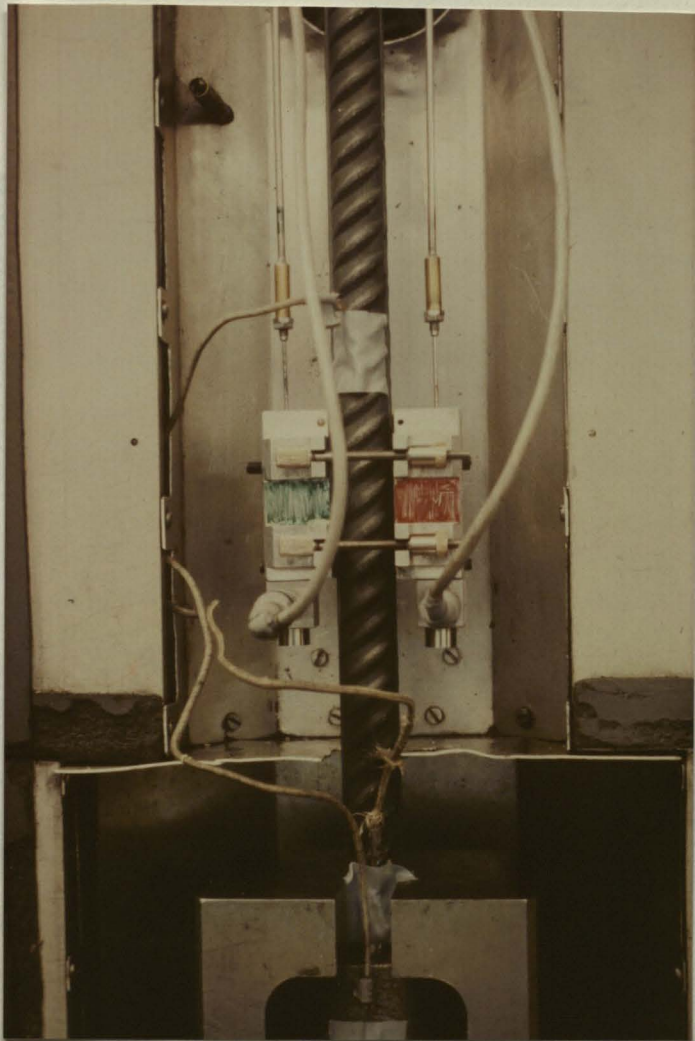
- /18/ Whiteley, J.D.; Armstrong, B.M.; Welburn, R.M.
Reinforcing and Prestressing Steels for Cryogenic Applications
British Steel Corporation
- /19/ Elices, M.; Corres, H.; Planas, J.
Behaviour at Cryogenic Temperatures of Steel for Concrete Reinforcement
Departamento de Fisica de Materiales, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Universidad Politecnica de Madrid
- /20/ Krämer, W.
Bewehrungsstähle für Flüssiggasbehälter
Krupp Stahl Aktiengesellschaft, 1981
- /21/ Martin, H.; Schießl, P
Verhalten von Betonstählen bei tiefen Temperaturen
-Kurzfassung-
Institut für Betonstahl und Stahlbetonbau e.V., München, 1976
- /22/ Bernard, A.
Comparative Tensile Tests on Notched Tempcore and Krybar Concrete Reinforcing Bars
Arbed Researches, 1982
- /23/ Lefevre, A.
Cryogenic Testing of Reinforcing Bars for the Containment Structures of LNG Storage Tanks
University of Ghent, Belgium, 1984
- /24/ Galland, J.C.; Saint Moulin, I. de; Walter, J.P.
Acceptance Criteria and Testing of Concrete Reinforcement for LNG Safety Structures
First International Conference on Cryogenic Concrete, Newcastle upon Tyne, 1981
- /25/ Bestimmung der chemischen Zusammenstellung von Betonstahl
Prüfungszeugnis MPSE-Schw 1500/88 vom 14.03.1988
Materialprüfungsstelle für Schweißtechnik und Werkstoffe, Technische Universität Braunschweig



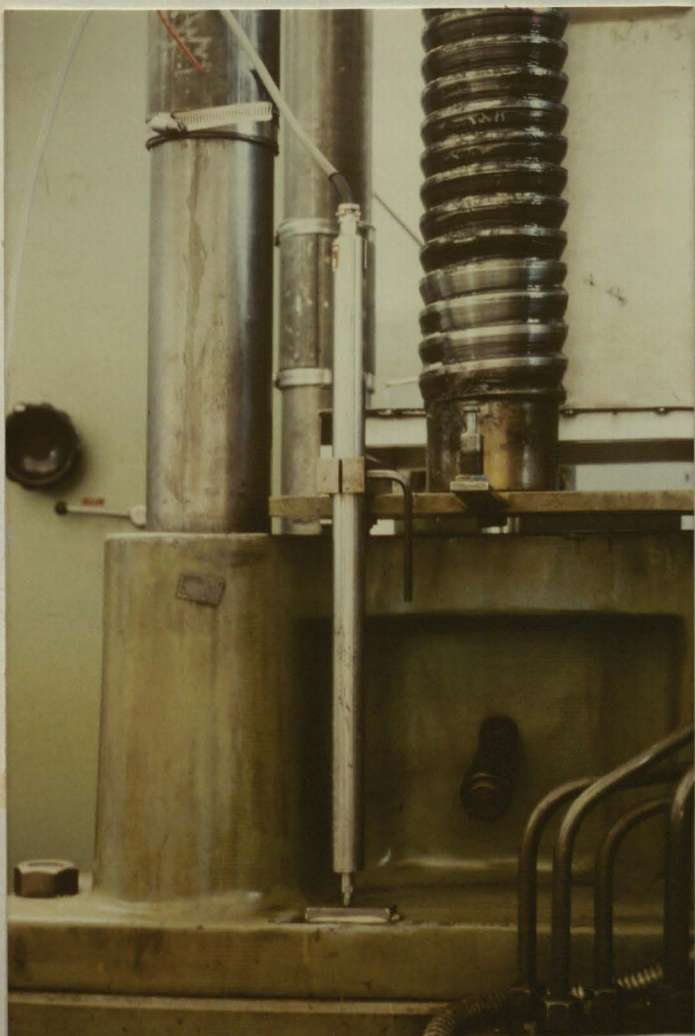
In der Zugprüfmaschine installierte 3-Zonen-Kältekammer (geöffnet) mit eingespannter Zugprobe



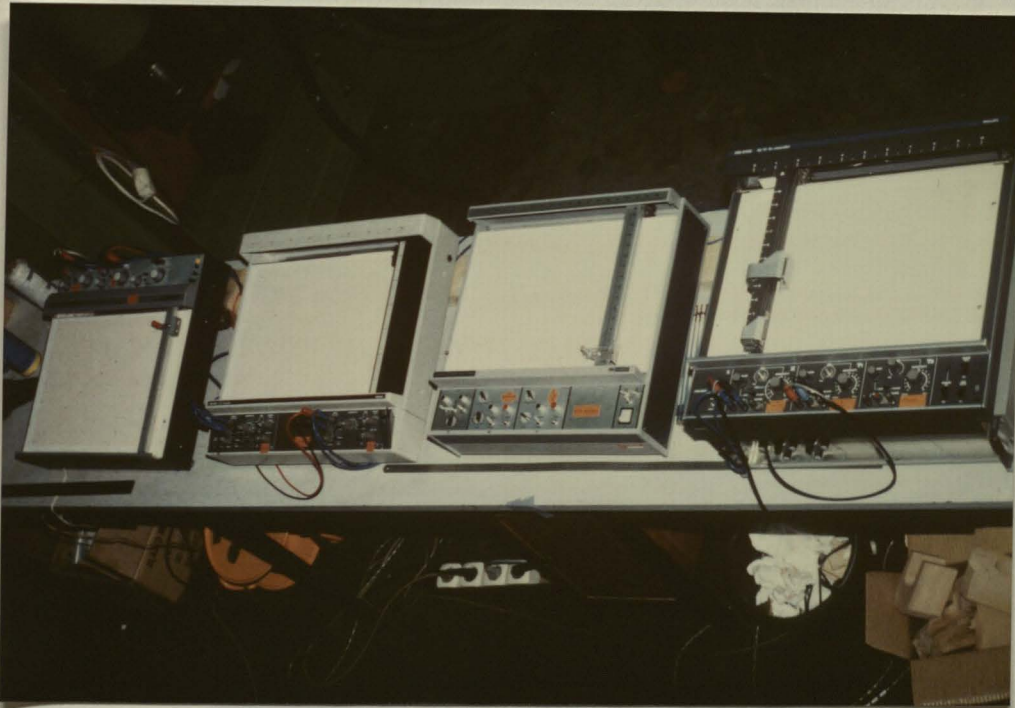
Regel- und Meßzentrale zur Versuchsführung



Zugprobe mit ausgerichtetem
Verlängerungsmeßsystem

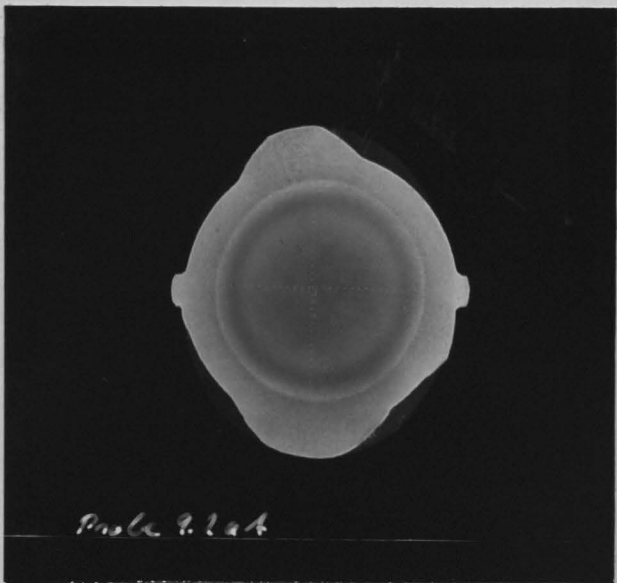


Anordnung des induktiven
Wegtasters (Aufzeichnen
eines Maschinendiagrammes)

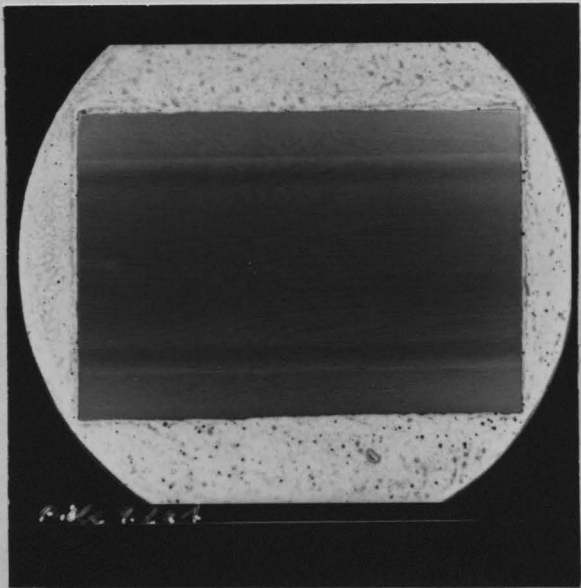


Parallele Registrierung der Kraft-Verlängerungs-Diagramme und des Maschinendiagrammes einer Zugprobe erfolgte mit X-Y-Flachschreibern auf DIN A3 - Papierformat.

Makrogefüge
der Probe A 9.2



Querschliff
mit
Härteeindrücken



- Randbereich
- Übergangsbereich
- Kernbereich

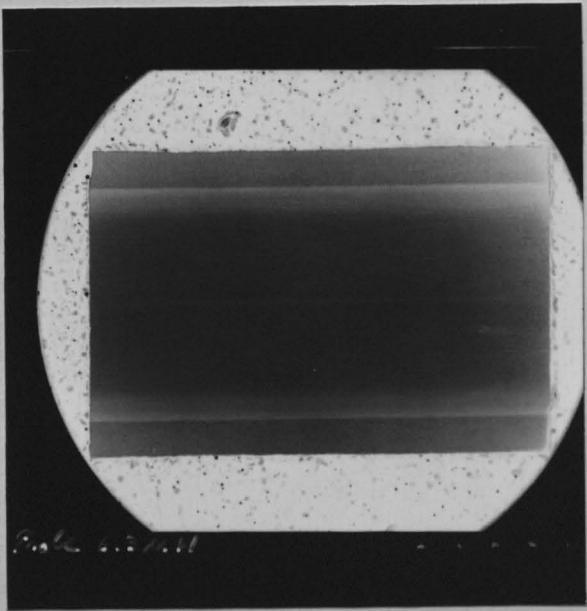
Längsschliff

Makrogefüge
der Probe B 6.3

Randbereich

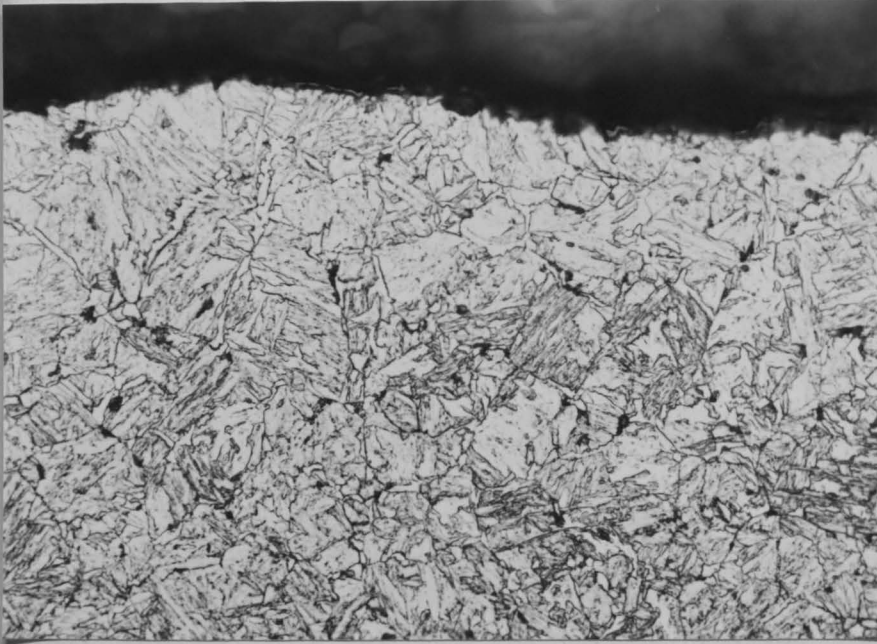


Querschliff
mit
Härteeindrücken



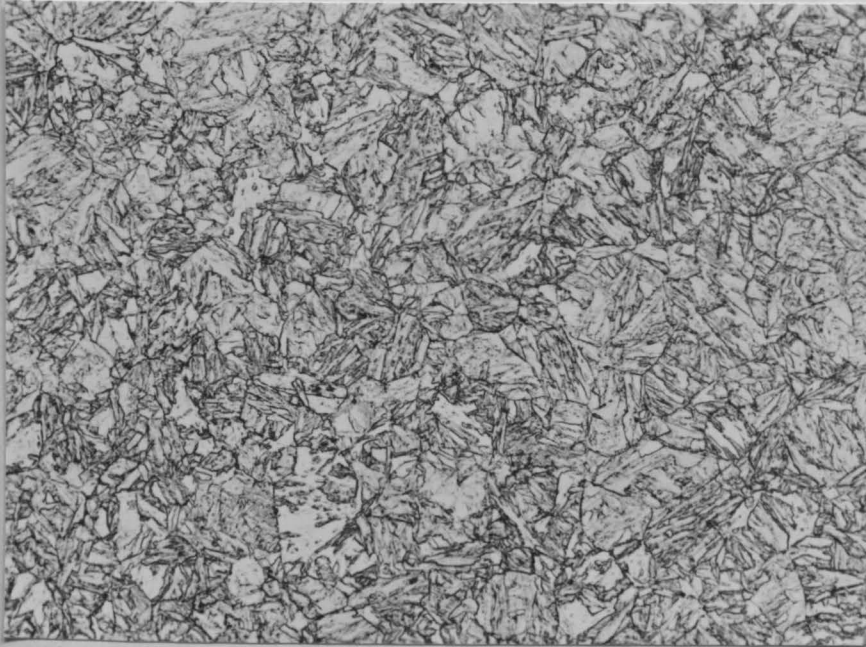
Randbereich
Übergangsbereich
Kernbereich

Längsschliff

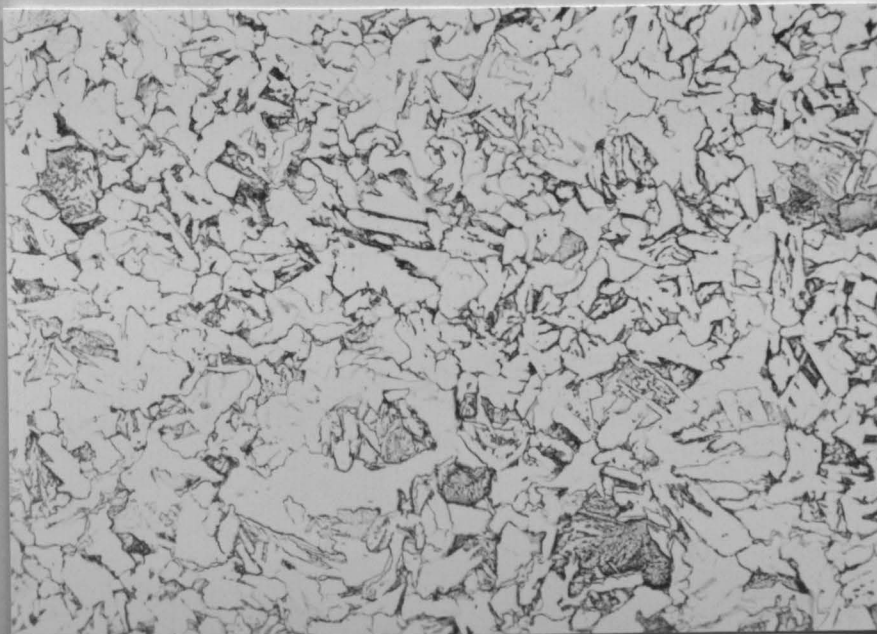


Vergrößerung
500 : 1

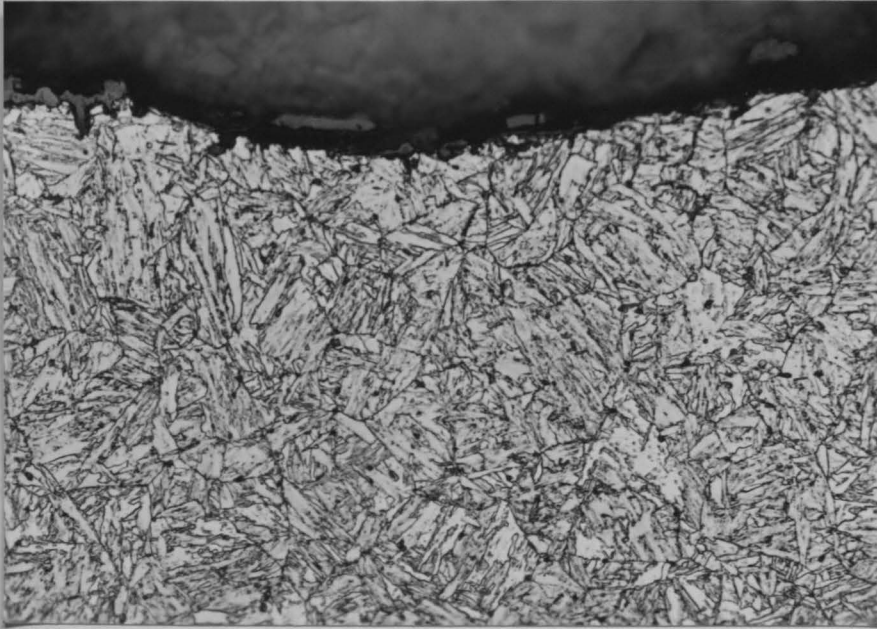
Randbereich



Übergangsbereich



Kernbereich

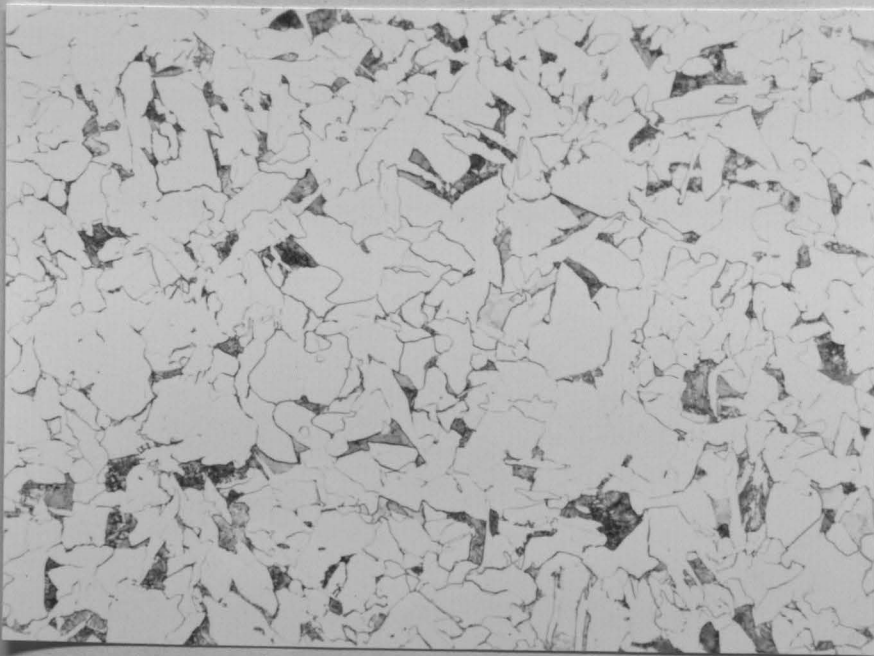


Vergrößerung
500 : 1

Randbereich



Übergangsbereich



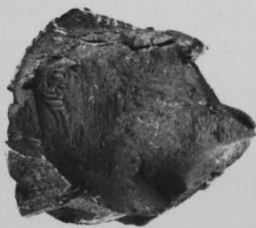
Kernbereich

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: + 20 °C

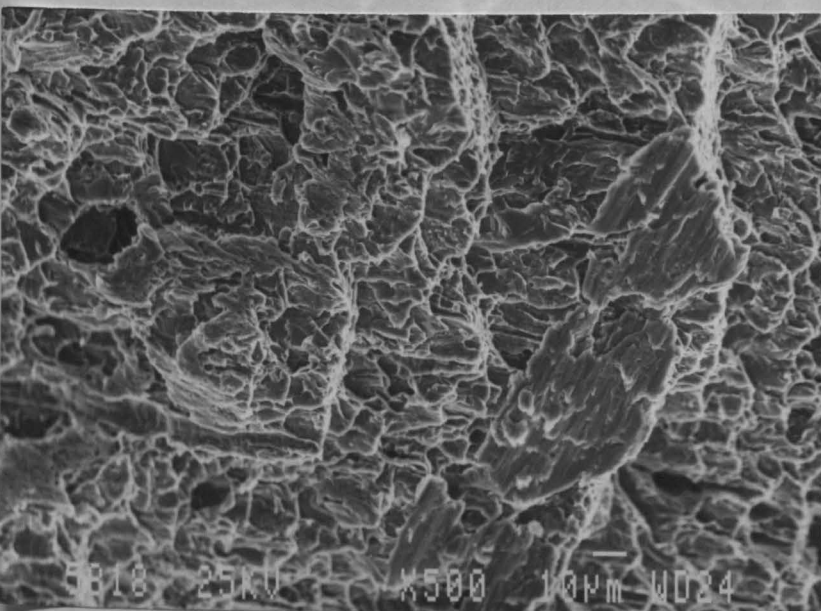
Probenbezeichnung: A 6.1

Brucheinschnürung: $Z_L = 52 \%$



Makroskopische Bruchmerkmale :

stark zerklüftete Bruchfläche;
Quasi-Schubspannungsbruch mit
deutlicher Brucheinschnürung

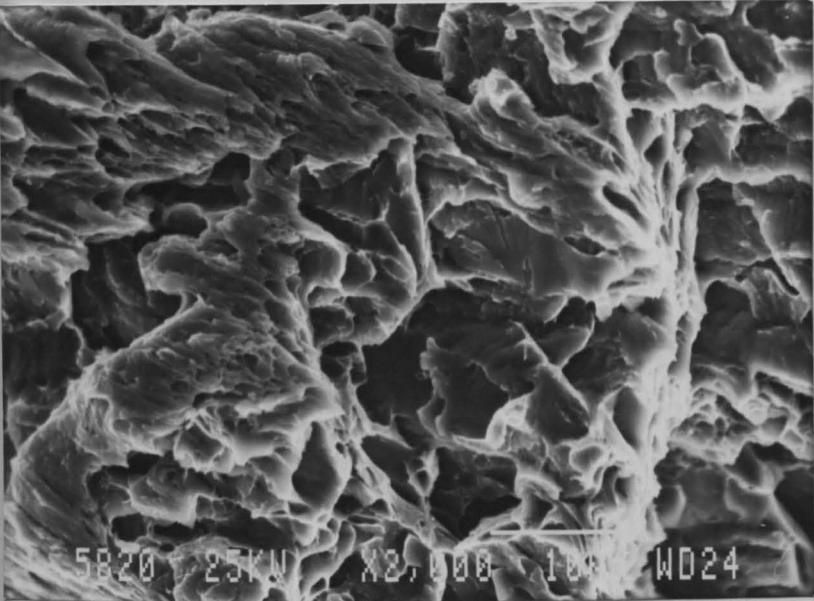


Mikroskopische Bruchmerkmale :

transkristalliner Gleit- oder
Wabenbruch; Schubwaben auf der
Fläche maximaler Schubspannung
unter ca. 45°

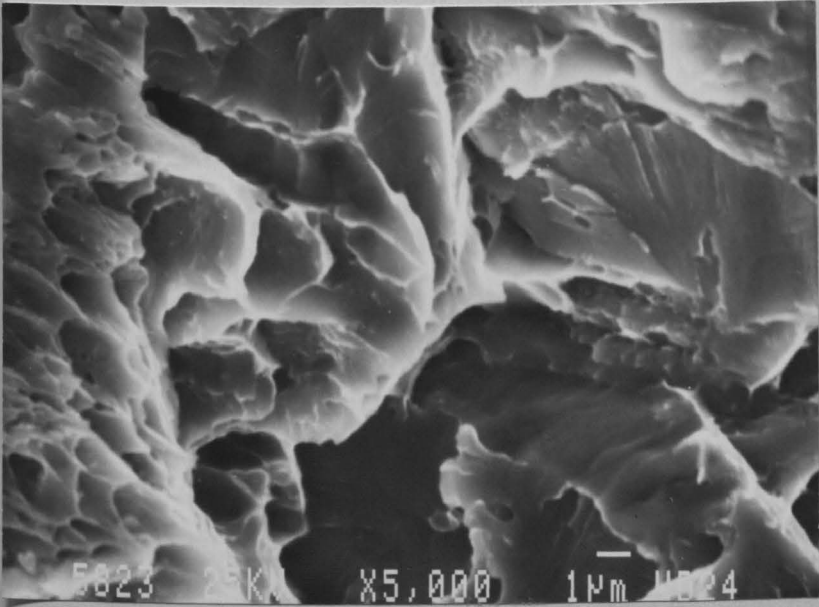
500 : 1

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A
Prüftemperatur...: + 20 °C
Probenbezeichnung: A 6.1
Brucheinschnürung: $Z_L = 52 \%$



Rand der Scherfläche

Merkmale :
Der größte Flächenanteil des Bruchrands liegt senkrecht zur größten Normalspannung (Normalspannungsbruch).
Diese Normalspannungsfläche ist relativ eben.
2000 : 1 des Bruchrands zeigt Scherungsflächen.



Rand der Scherfläche

Die Bruchausgangsstelle liegt ca. 3 mm vom Probenrand entfernt. Die durch die Bruchverformung deutlich wird.
5000 : 1

ANLAGE 5.7

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur....: - 60 °C

Probenbezeichnung: A 13.3

Brucheinschnürung: $Z_L = 50$ %

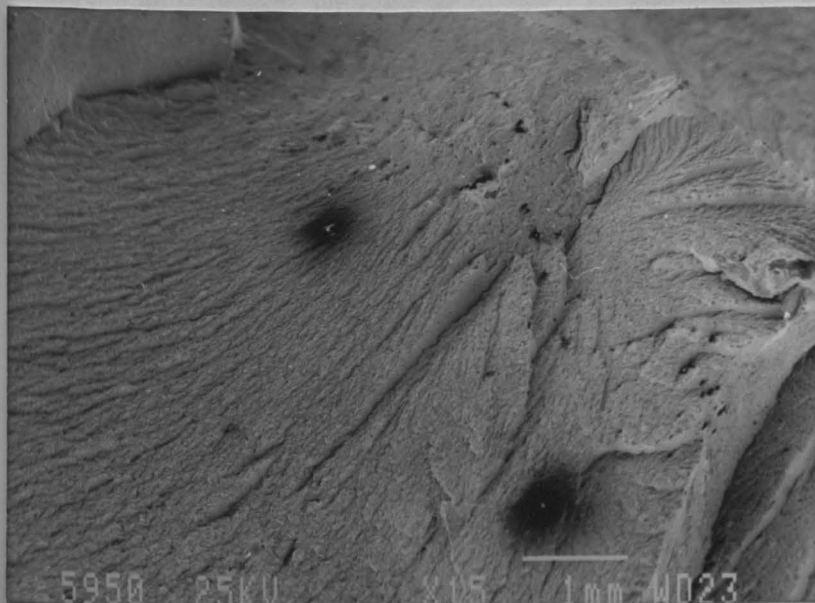


Makroskopische Bruchmerkmale :

Der größte Flächenanteil des Bruchufers liegt senkrecht zur größten Normalspannung (Normalspannungsbruch). *schon erkennbar.*

Diese Normalspannungsfläche ist relativ eben.

Der Rand des Bruchufers zeigt Schubspannungslippen.



Die Bruchausgangsstelle liegt ca. 2 mm vom Probenrand entfernt, wie durch die Bruchverlaufslinien deutlich wird.

15 : 1

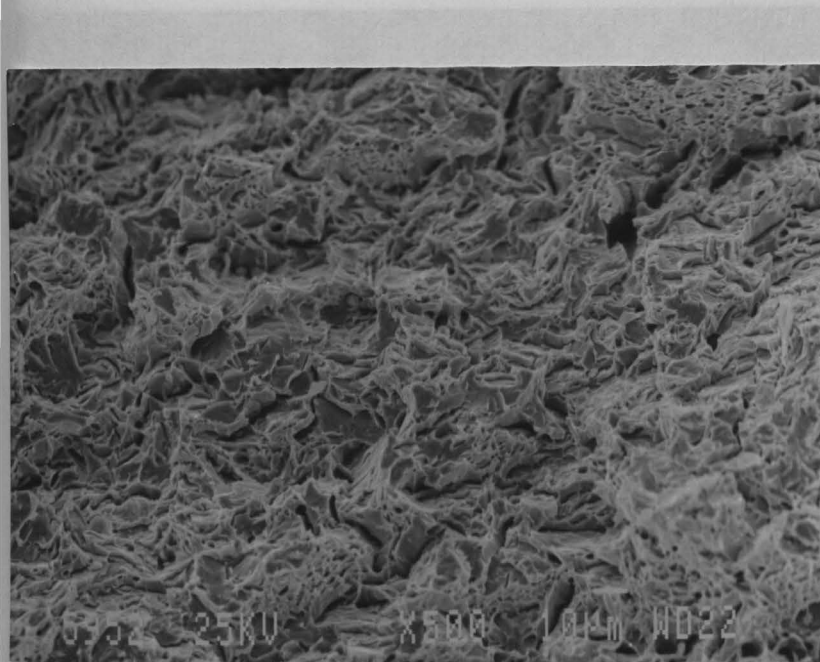
ANLAGE 5.8

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur....: - 60 °C

Probenbezeichnung: A 13.3

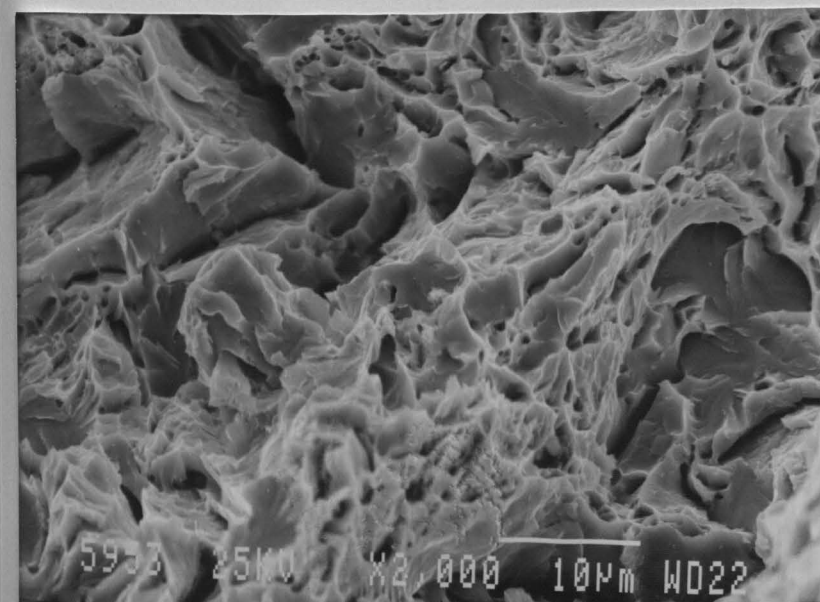
Brucheinschnürung: $Z_L = 50 \%$



Mikroskopische Bruchmerkmale:

In der Mitte des Bruchufers ist Wabenstruktur mit vereinzelt Spaltflächen erkennbar.

500 : 1



Probenmitte

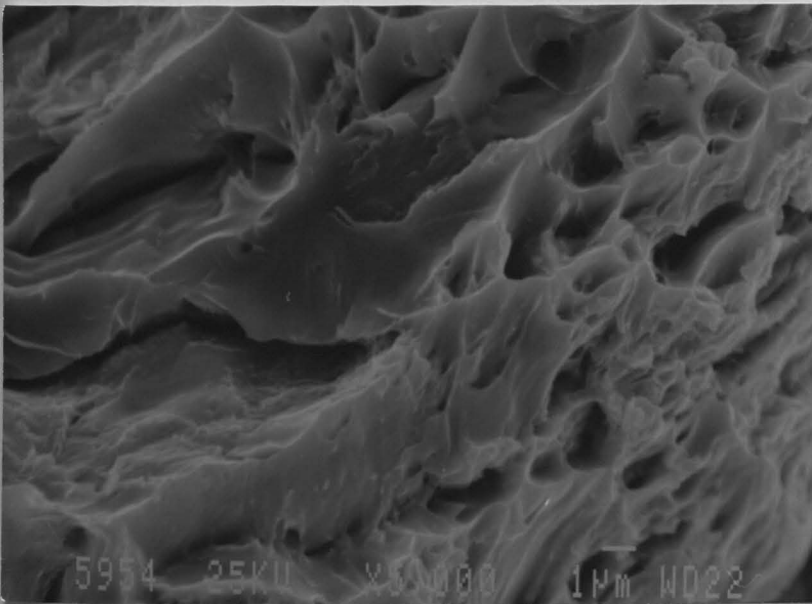
2000 : 1

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: - 60 °C

Probenbezeichnung: A 13.3

Brucheinschnürung: $Z_L = 50 \%$



Probenmitte

Normalspannungsbruch mit
deutlicher Brucheinschnürung.
Bruchufer weist einen schmalen,
geschlossenen Schubspannungs-
Rippen-Ring am Rand auf.

5000 : 1

Werkstoffliche Bruchmerkmale :

Zwischen den Spaltflächen sind
vereinzelt Wabenbruchsäume
zu erkennen.

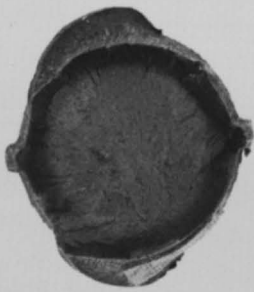
500 : 1

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: - 120 °C

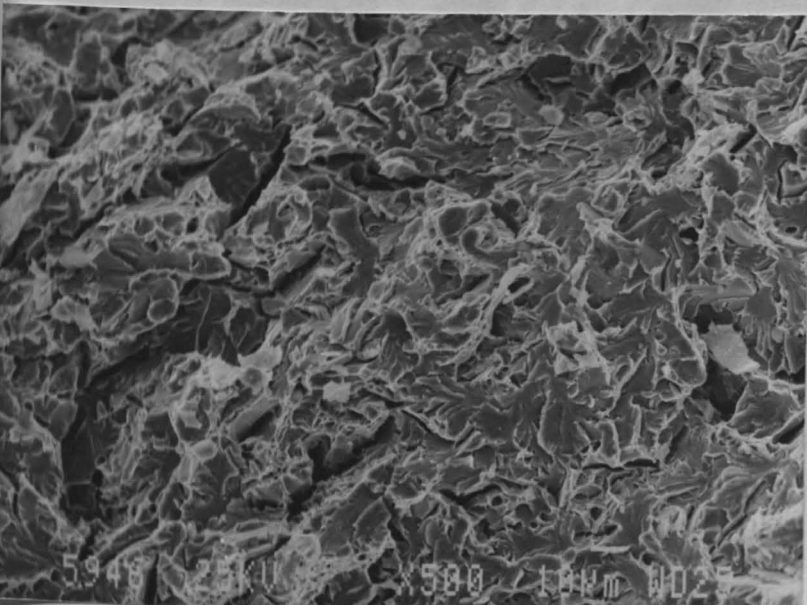
Probenbezeichnung: A 13.1

Brucheinschnürung: $Z_L = 43 \%$



Makroskopische Bruchmerkmale :

Normalspannungsbruch mit deutlicher Brucheinschnürung; Bruchufer weist einen schmalen, geschlossenen Schubspannungslippen-Ring am Rand auf.

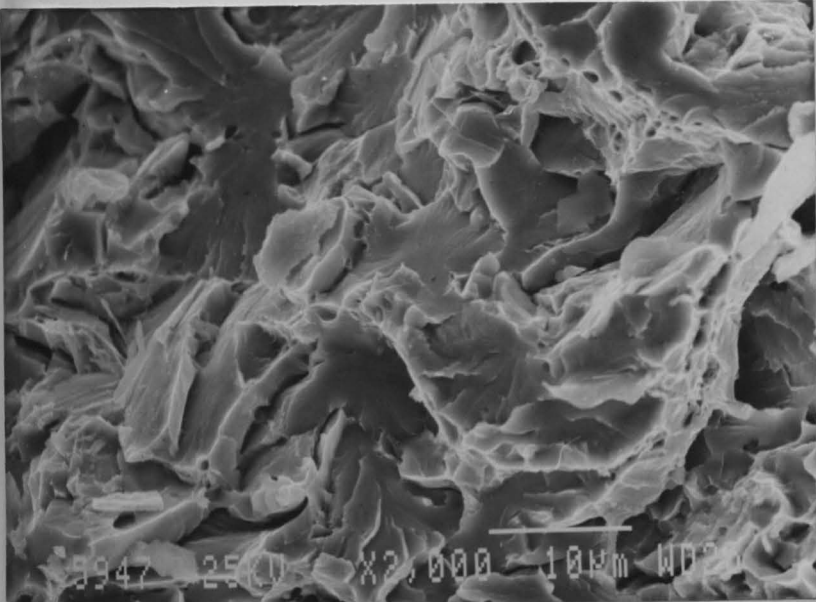


Mikroskopische Bruchmerkmale :

Zwischen den Spaltflächen sind vereinzelte Wabenbruchsäume zu erkennen.

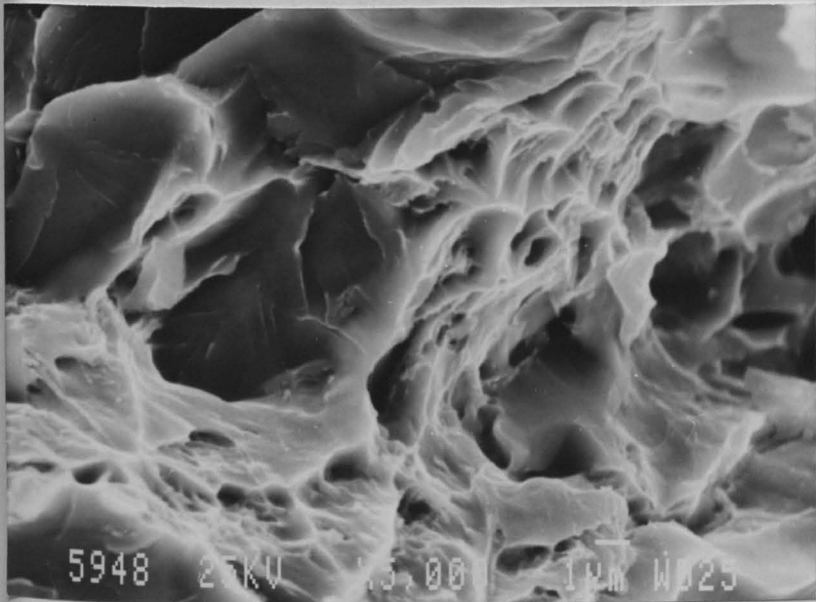
500 : 1

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A
Prüftemperatur...: - 120 °C
Probenbezeichnung: A 13.1
Brucheinschnürung: $Z_L = 43 \%$



Probenmitte

2000 : 1



Probenmitte

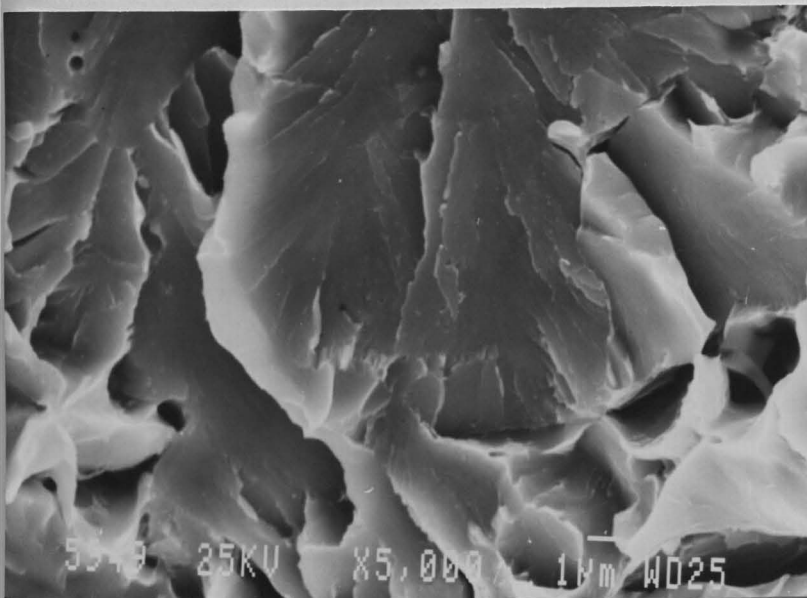
5000 : 1

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: - 120 °C

Probenbezeichnung: A 13.1

Brucheinschnürung: $Z_L = 43$ %



Probenmitte

Spaltflächen mit Spalt-
facetten

5000 : 1

ANLAGE 5.13

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: - 160 °C

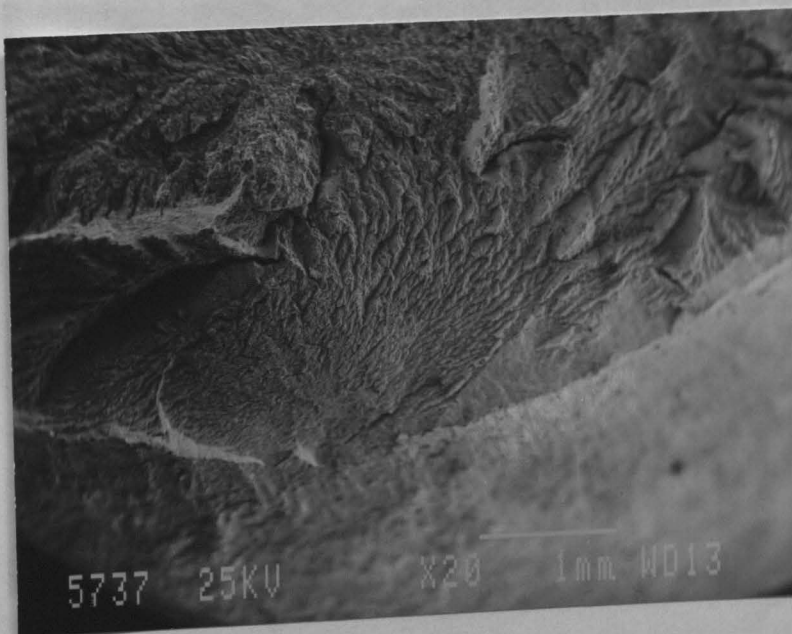
Probenbezeichnung: A 15,3

Brucheinschnürung: $Z_L = 37$ %



Normalspannungsbruch

Spaltbruch mit vereinzelten
Kornbruchanteilen



Bruchausgangsstelle am
Probenrand wird durch die
Bruchverlaufslinien er-
kennbar.

Denen. Dadurch
entsteht ein feiner, un-
gleichmäßiger Spaltbruch.

20:1

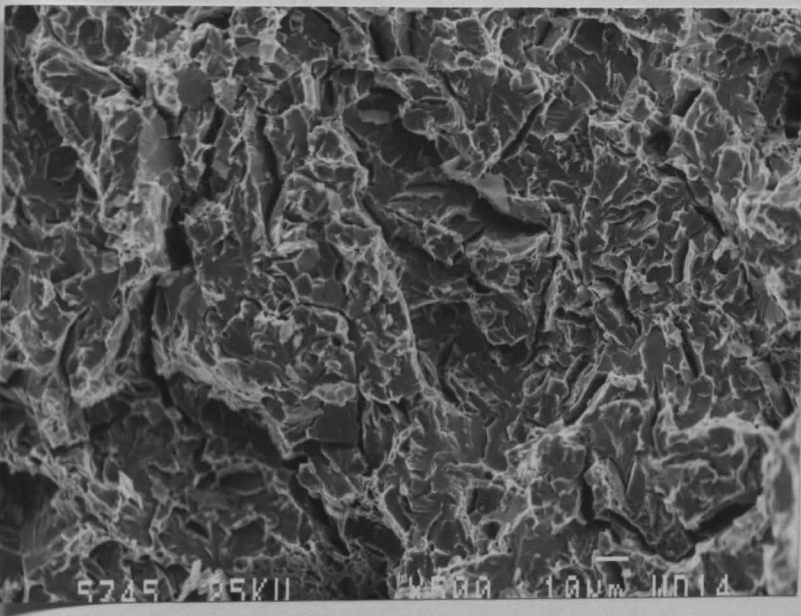
ANLAGE 5.14

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: - 160 °C

Probenbezeichnung: A 15,3

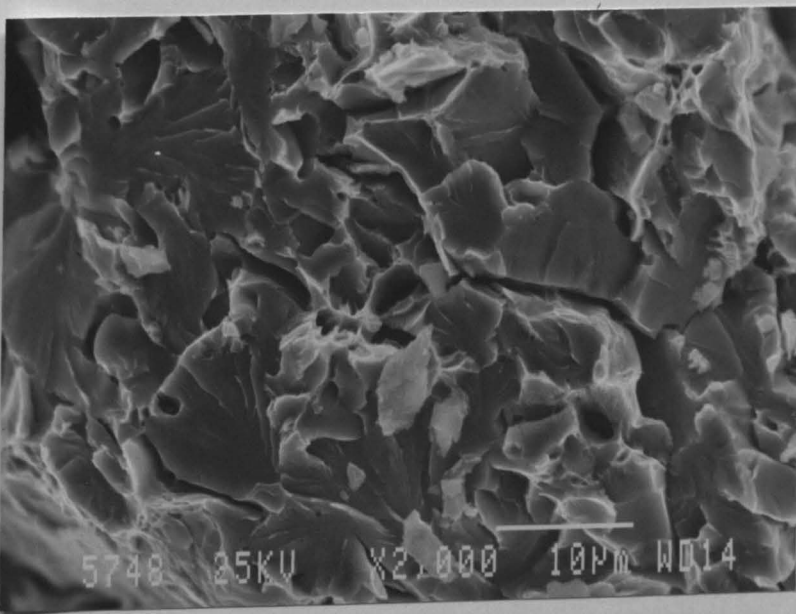
Brucheinschnürung: $Z_L = 37 \%$



Probenmitte

Spaltbruch mit vereinzelt
Wabenbruchanteilen

500 : 1



Probenmitte

Spaltbruch: Der Bruch
erfolgte nicht nur an
niedrig indizierten
Spaltebenen. Dadurch
entsteht ein feiner, un-
gleichmäßiger Spaltbruch.

2000 : 1

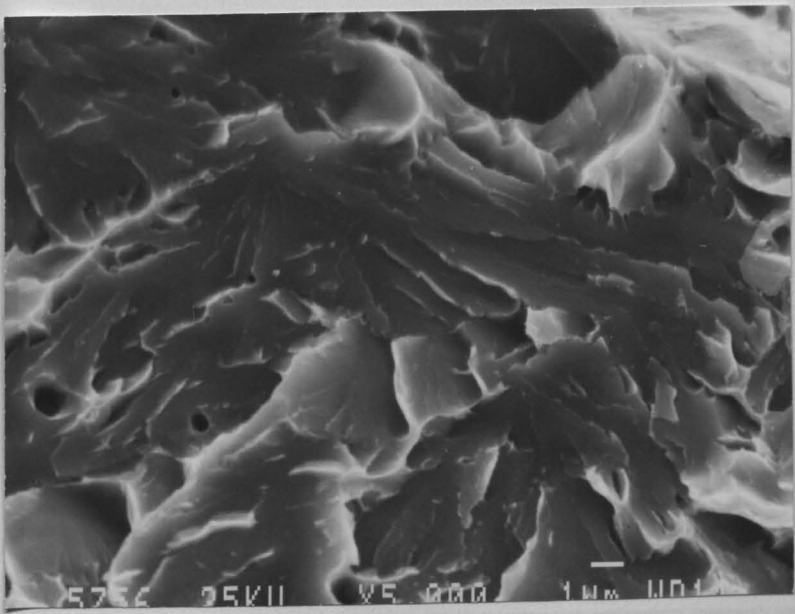
ANLAGE 5.15

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: - 160 °C

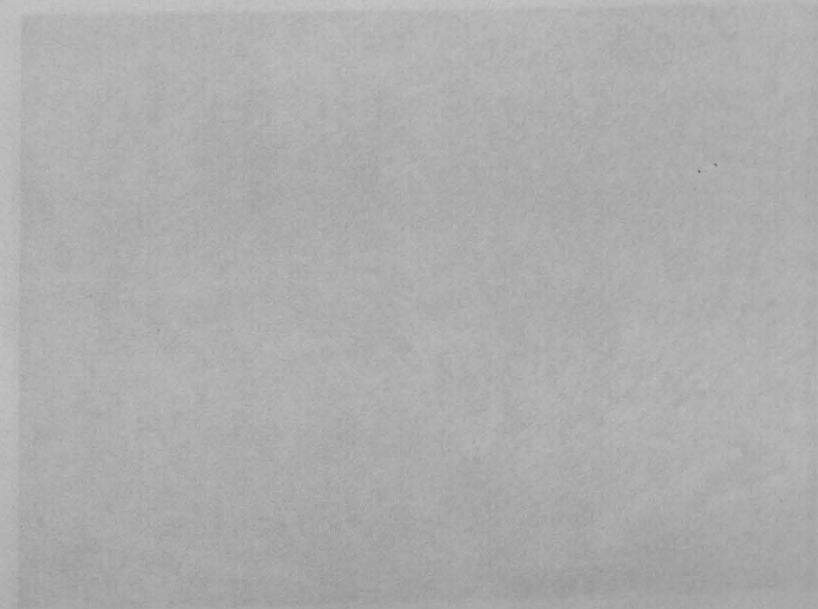
Probenbezeichnung: A 15,3

Brucheinschnürung: $Z_L = 37 \%$



Probenmitte
Spaltbruch

5000 : 1



Bruchausgangsstelle an
Kantenrand wird durch die
Bruchausgangsstelle
bestimmt

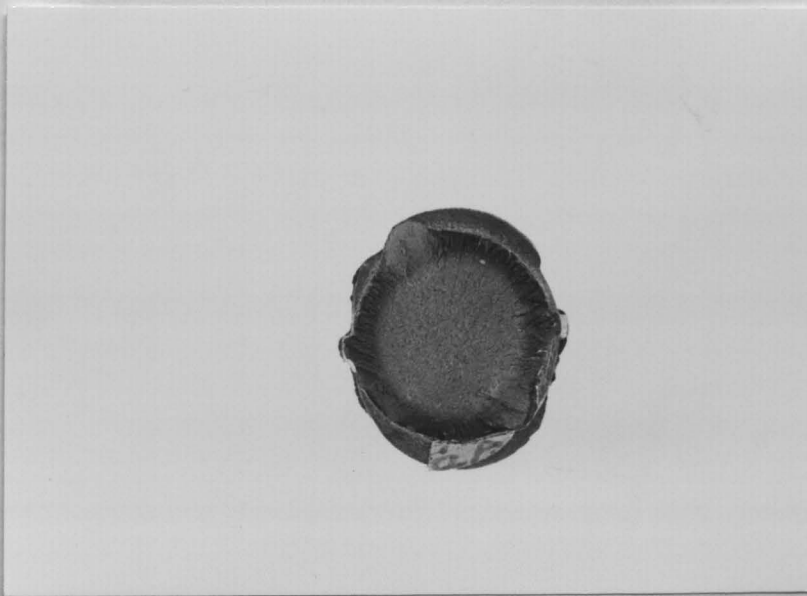
ANLAGE 5.16

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

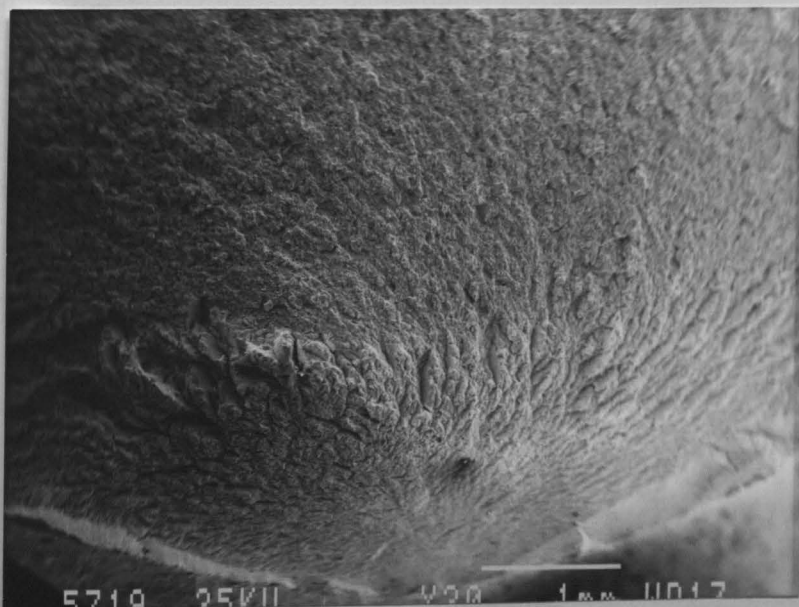
Prüftemperatur....: - 180 °C

Probenbezeichnung: A 11.1

Brucheinschnürung: $Z_L = 36 \%$



Normalspannungsbruch



Bruchausgangsstelle am Probenrand wird durch die Bruchverlaufslinien erkennbar.

20 : 1

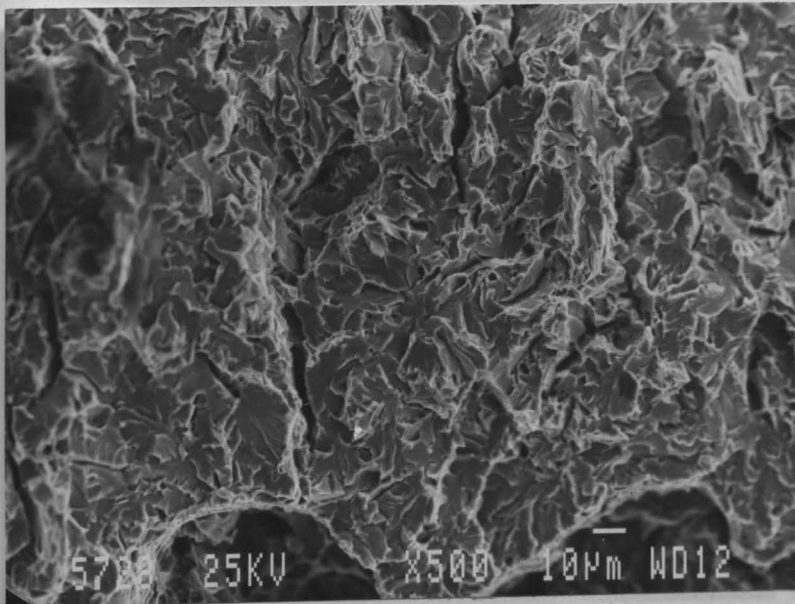
ANLAGE 5.17

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A

Prüftemperatur...: - 180 °C

Probenbezeichnung: A 11.1

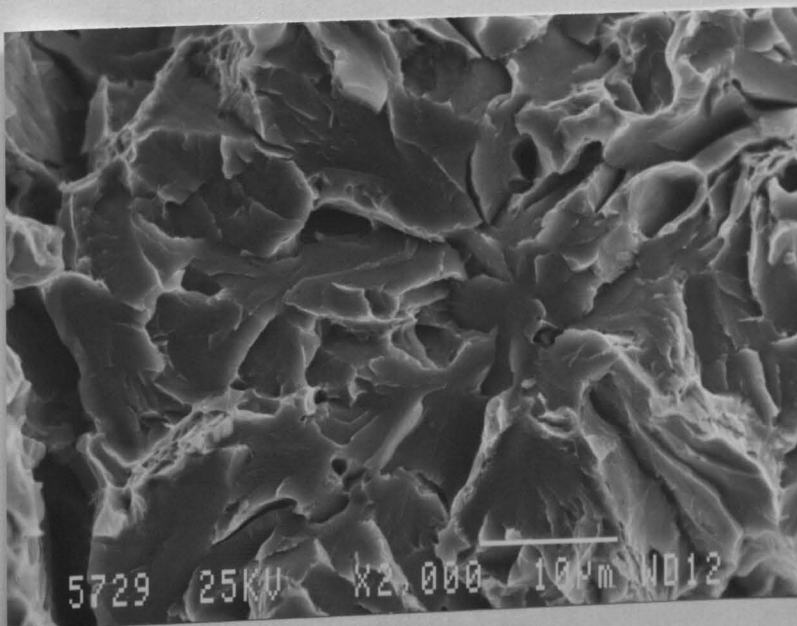
Brucheinschnürung: $Z_L = 36. \%$



Probenmitte

Spaltbruch

500 : 1



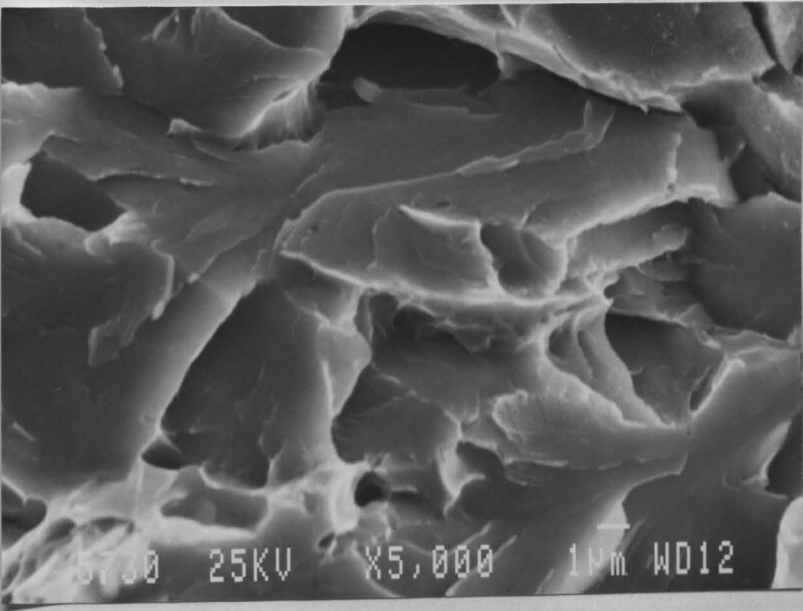
Probenmitte

Spaltbruch mit vereinzel-
ten Wabenbruchanteilen

2000 : 1

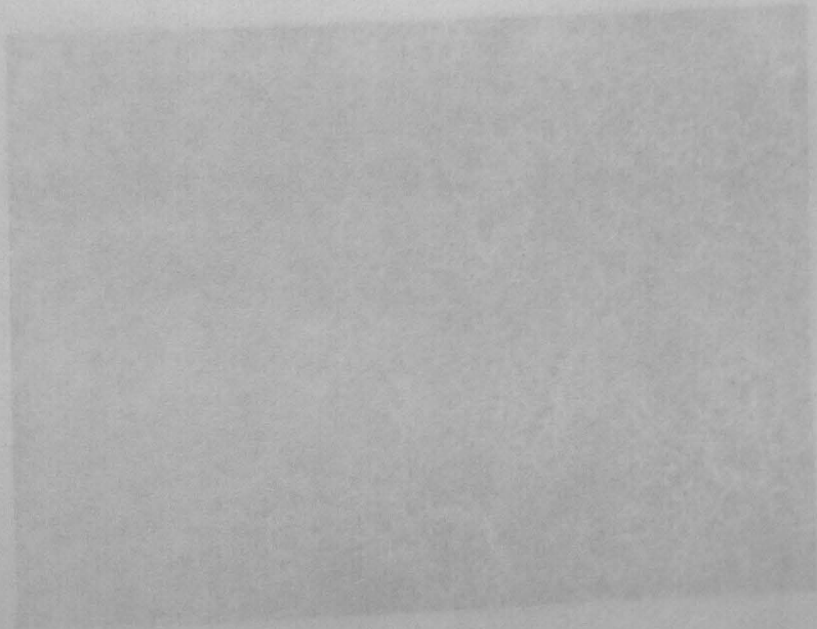
ANLAGE 5.18

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial A
Prüftemperatur....: - 180 °C
Probenbezeichnung: A 11.1
Brucheinschnürung: $Z_L = 36,0 \%$



Probenmitte schräg oben
Spaltbruch

5000 : 1



Normalspannungsbruch-
fläche in der Proben-
mitte mit Webstruktur

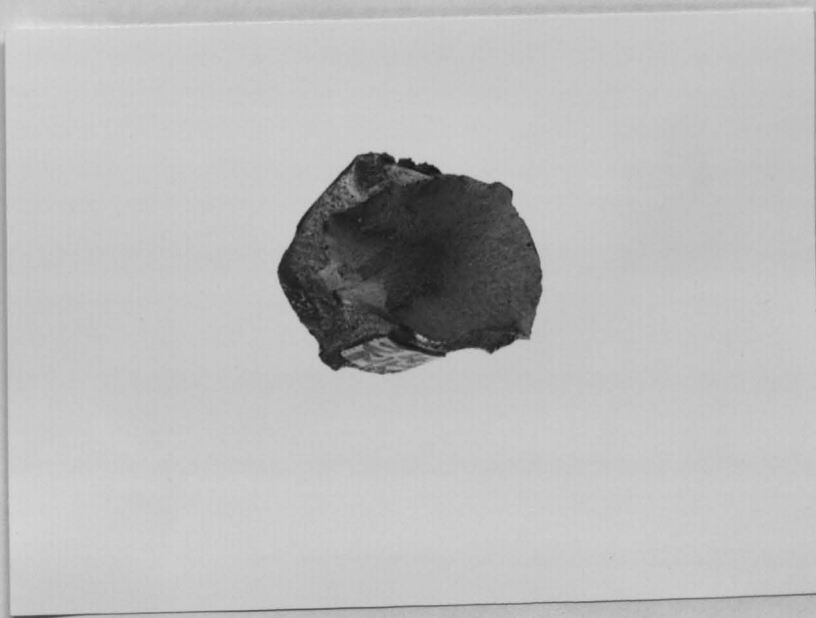
ANLAGE 5.19

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

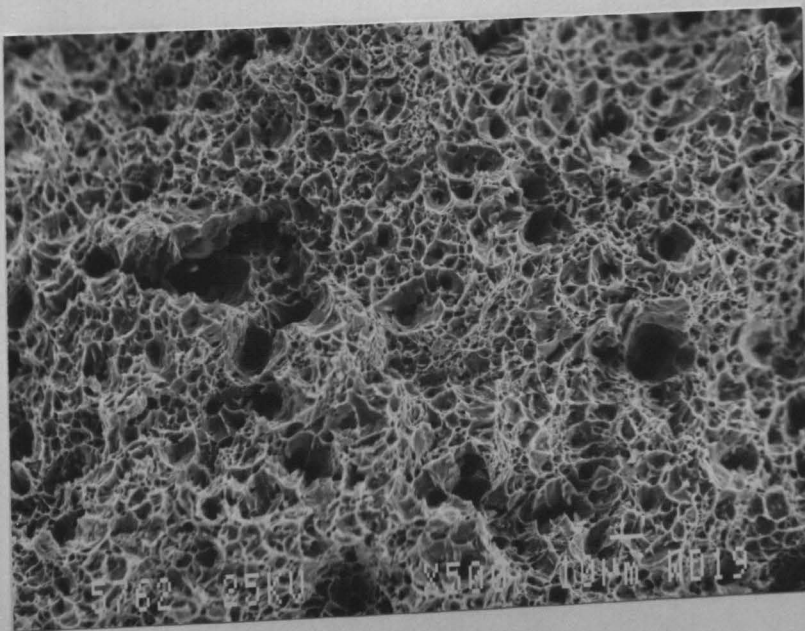
Prüftemperatur...: + 20 °C

Probenbezeichnung: B 2.4

Brucheinschnürung: $Z_L = 58 \%$



Ansicht von schräg oben
auf die Fragmente des
Kegel-Tasse-Bruches



Normalspannungsbruch-
fläche in der Proben-
mitte mit Wabenstruktur

500 : 1

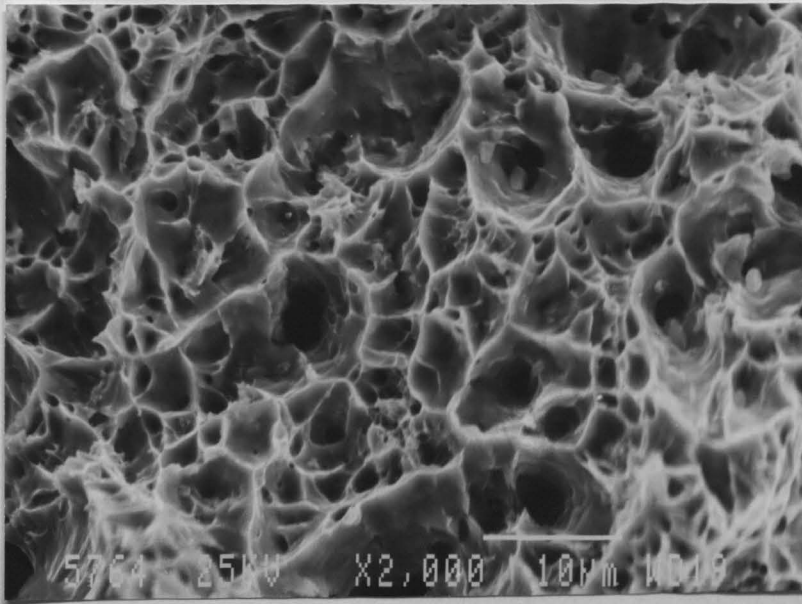
ANLAGE 5.20

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

Prüftemperatur...: + 20 °C

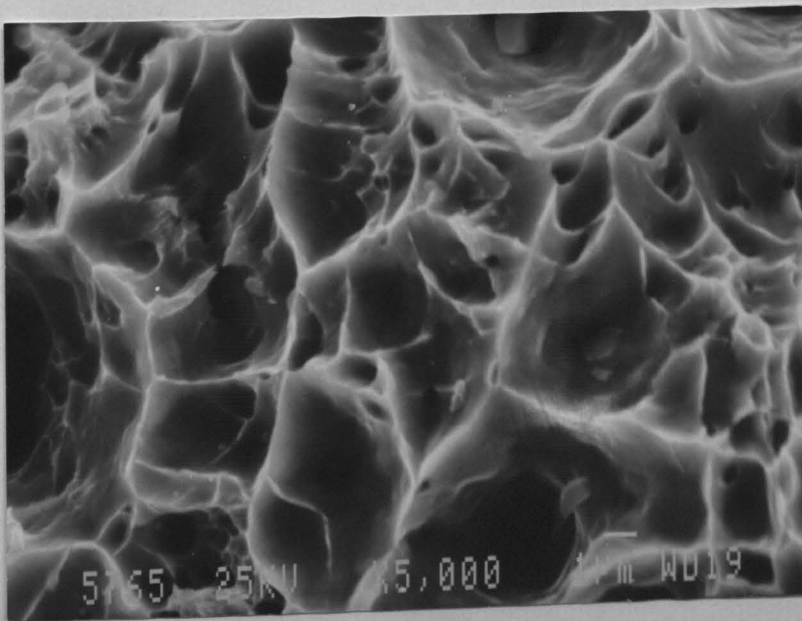
Probenbezeichnung: B 2.4

Brucheinschnürung: $Z_L = 58 \%$



Normalspannungsbruch-
fläche in der Proben-
mitte mit Wabenstruktur

2000 : 1



Normalspannungsbruch-
fläche in der Proben-
mitte mit Wabenstruktur

5000 : 1

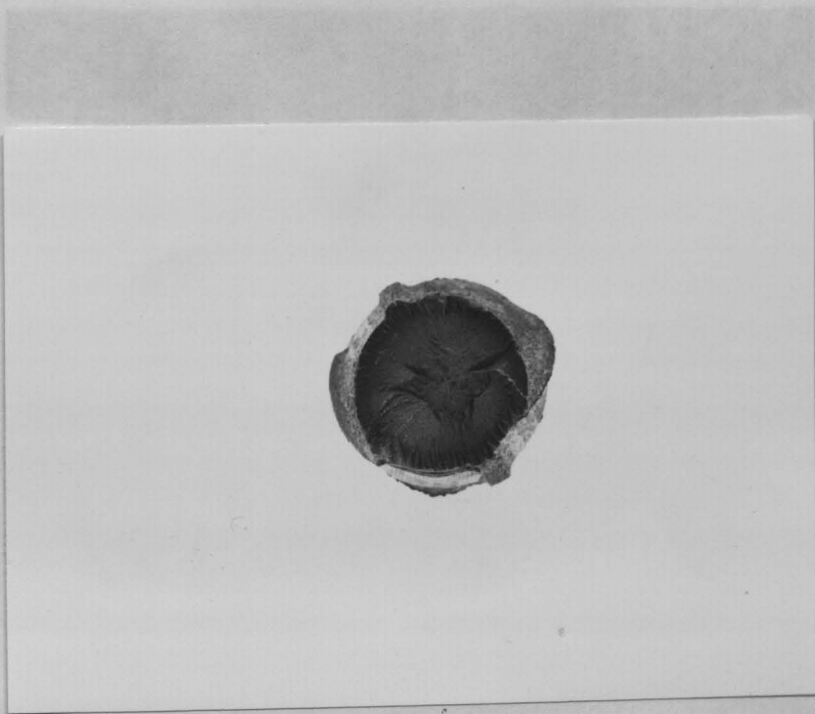
ANLAGE 5.21

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

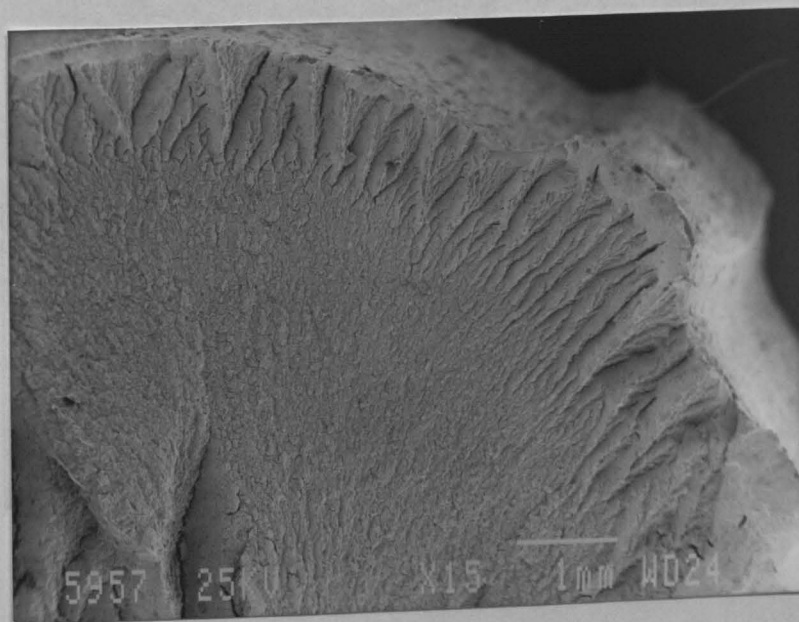
Prüftemperatur...: - 120 °C

Probenbezeichnung: B 12.5

Brucheinschnürung: $Z_L = 52 \%$



Normalspannungsbruch-
fläche mit Fräserbruch-
ring



Übergang von der
Normalspannungsbruch-
fläche in den Fräser-
bruchbereich

15 : 1

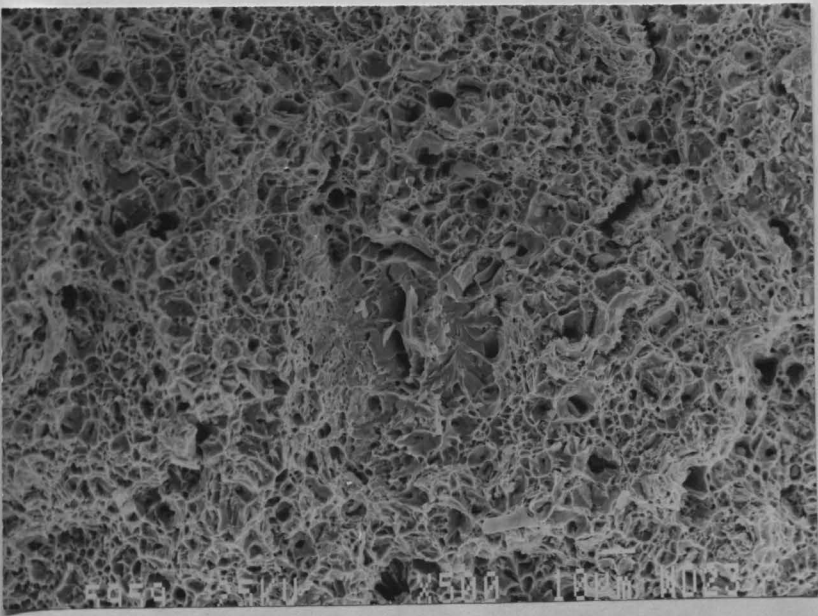
ANLAGE 5.22

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

Prüftemperatur...: - 120 °C

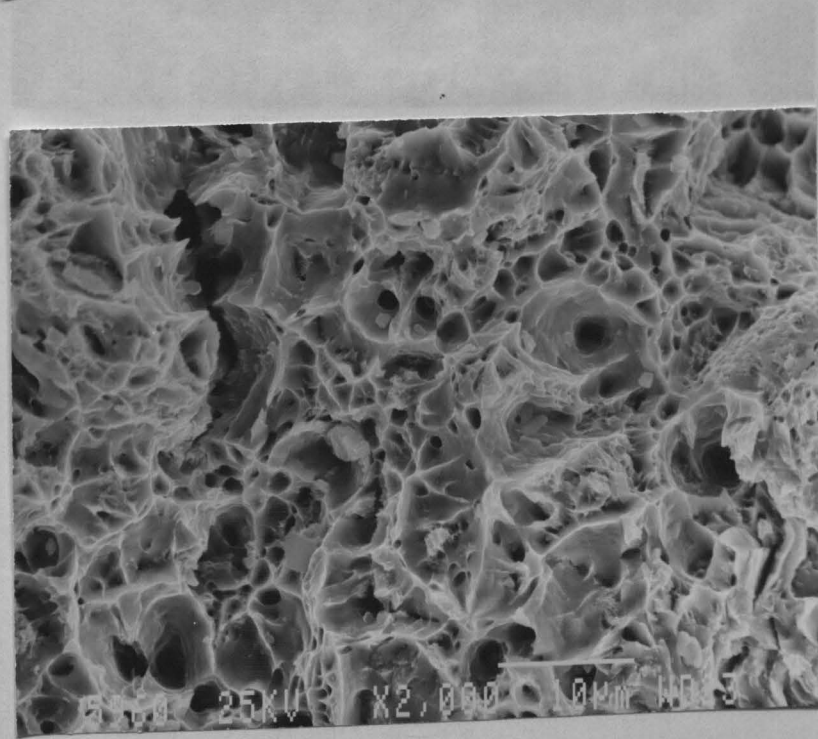
Probenbezeichnung: B 12.5

Brucheinschnürung: $Z_L = 52 \%$



Probenmitte
Wabenbruch

500 : 1



Probenmitte
Wabenbruch

2000 : 1

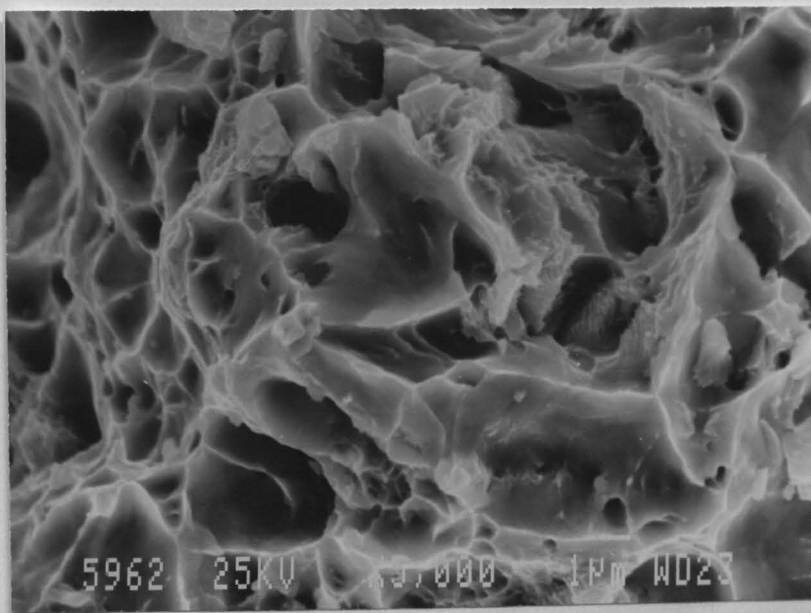
ANLAGE 5.23

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

Prüftemperatur...: - 120 °C

Probenbezeichnung: B 12.5

Brucheinschnürung: $Z_L = 52 \%$



Probenmitte

Wabenbruch

5000 : 1

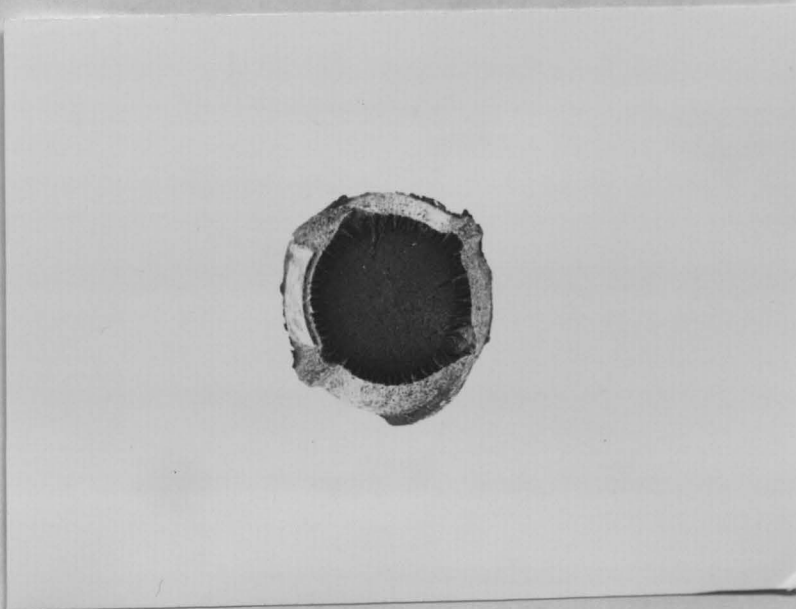
ANLAGE 5.24

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

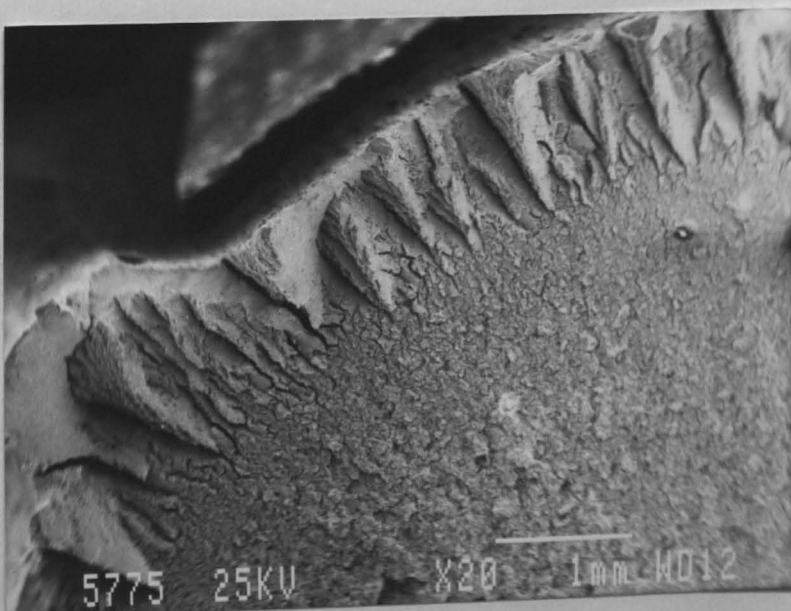
Prüftemperatur...: - 160 °C

Probenbezeichnung: B 7.4

Brucheinschnürung: $Z_L = 58 \%$



Normalspannungsbruch-
fläche mit Fräserbruch-
ring



Übergang von der Normal-
spannungsbruchfläche
in den Fräserbruchbereich.

20 : 1

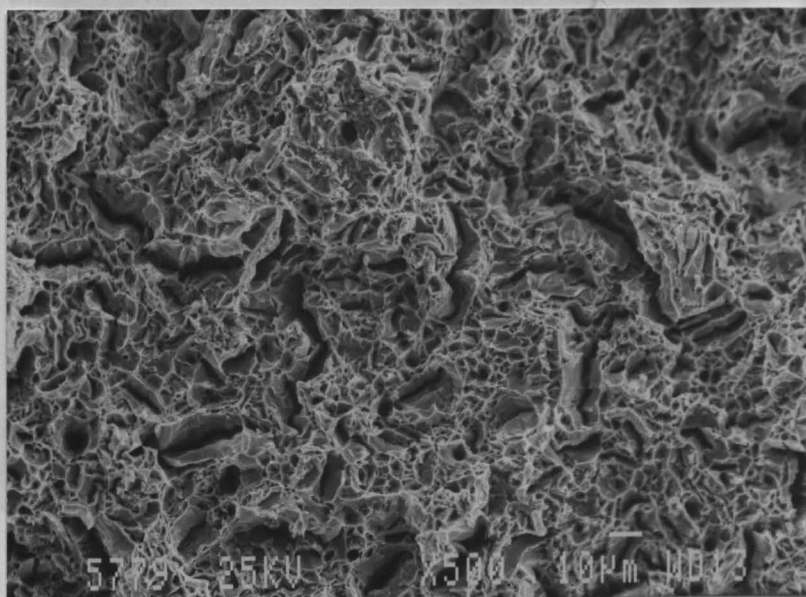
ANLAGE 5,25

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

Prüftemperatur...: - 160 °C

Probenbezeichnung: B 7.4

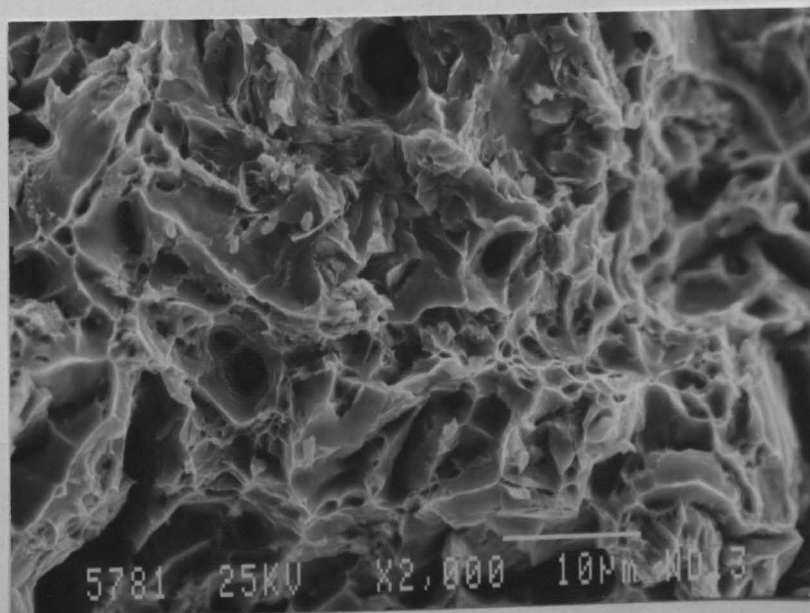
Brucheinschnürung: $Z_L = 58 \%$



Probenmitte

Wabenbruch

500 : 1



Probenmitte

Wabenbruch

2000 : 1

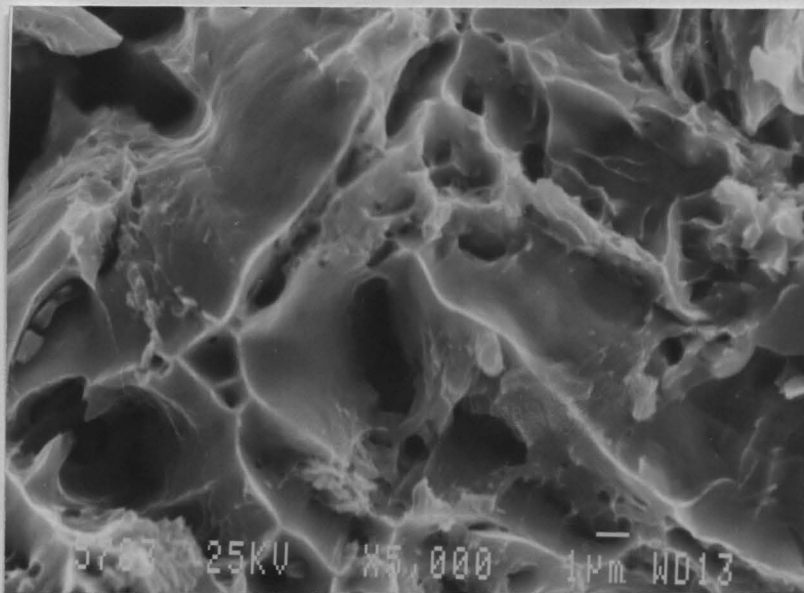
ANLAGE 5,26

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

Prüftemperatur...: - 160 °C

Probenbezeichnung: B 7.4

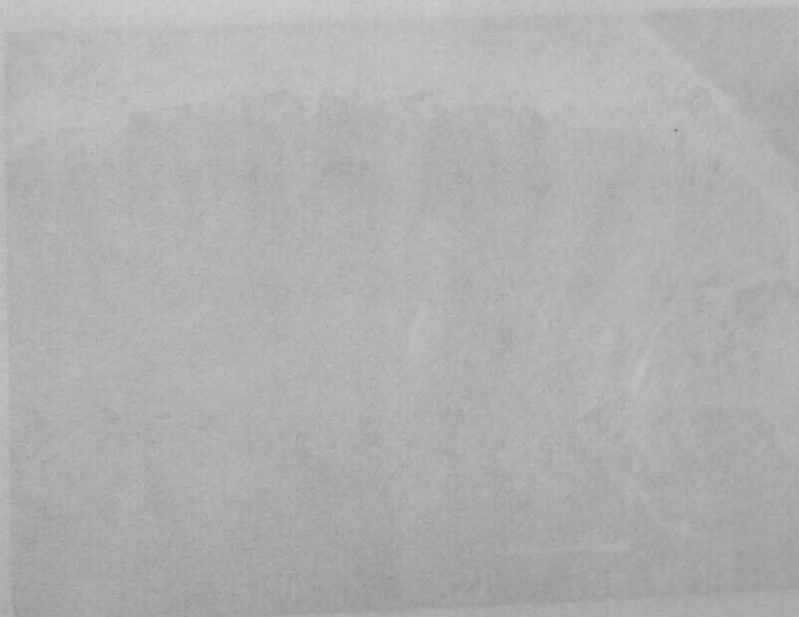
Brucheinschnürung: $Z_L = 58 \%$



Probenmitte

Wabenbruch

5000 : 1



Übergang von der
Kernspannungsbruch-
fläche in den Faserbruch-
bereich

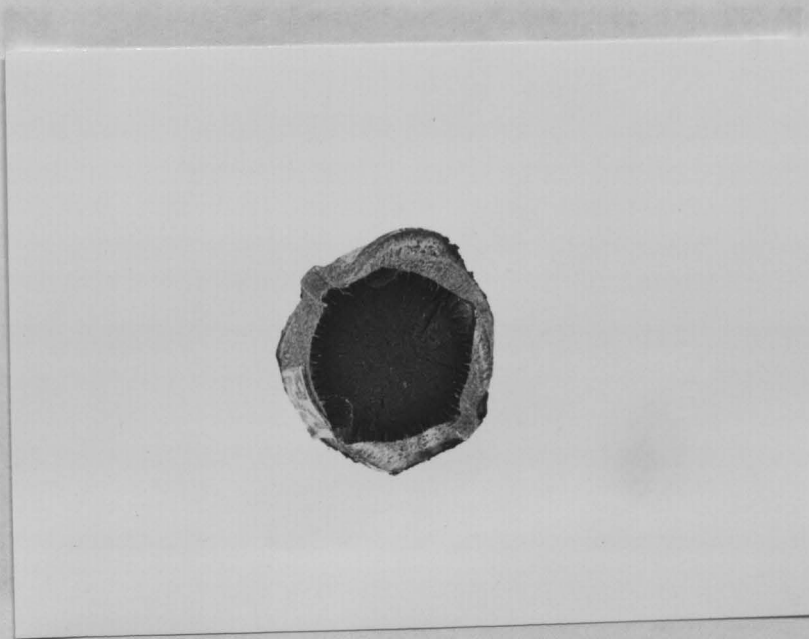
ANLAGE 5.27

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

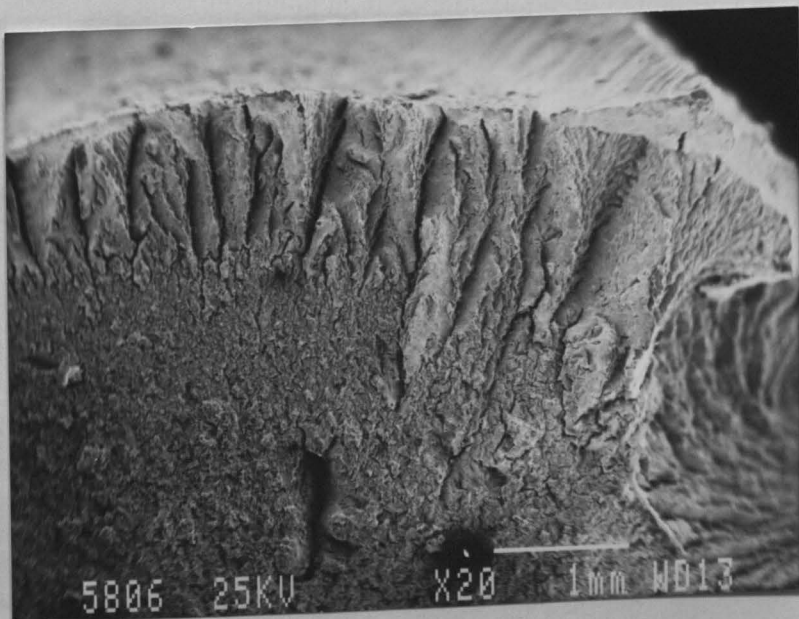
Prüftemperatur...: - 180 °C

Probenbezeichnung: B 9.1

Brucheinschnürung: $Z_L = 56 \%$



ebene Normal-
spannungsbruchfläche
mit Fräserbruchring



Übergang von der
Normalspannungsbruch-
fläche in den Fräserbruch-
bereich

20 : 1

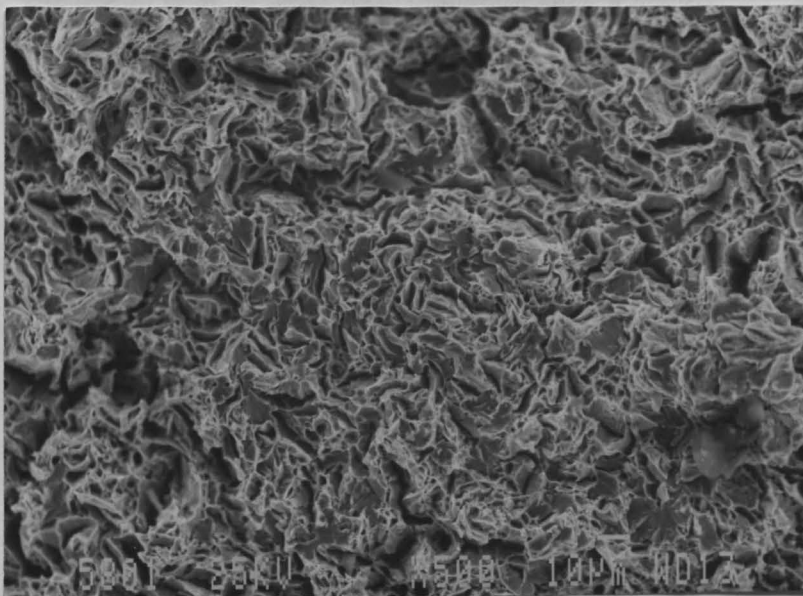
ANLAGE 5,28

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

Prüftemperatur...: - 180 °C

Probenbezeichnung: B 9.1

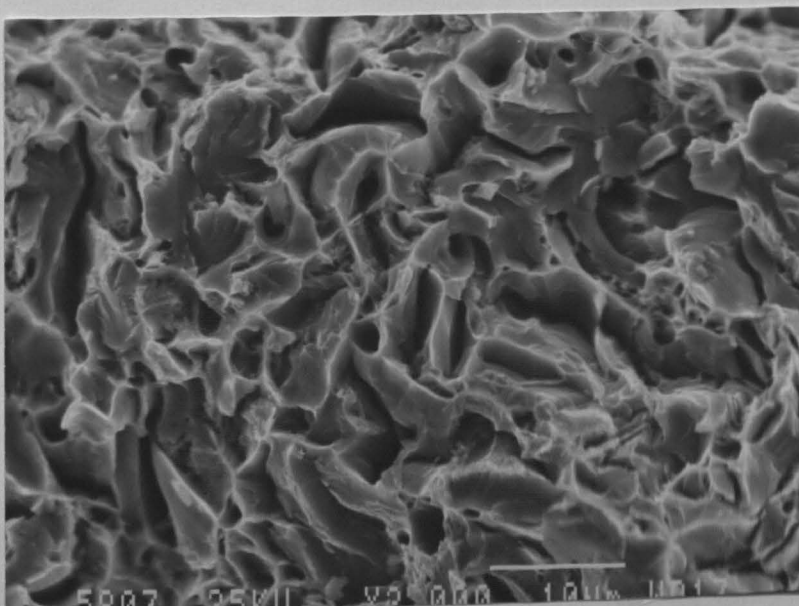
Brucheinschnürung: $Z_L = 56 \%$



Probenmitte

Mischbruch aus Waben
und Spaltflächen

500 : 1



Probenmitte

Wabenbruch mit
Spaltbruchanteilen

2000 : 1

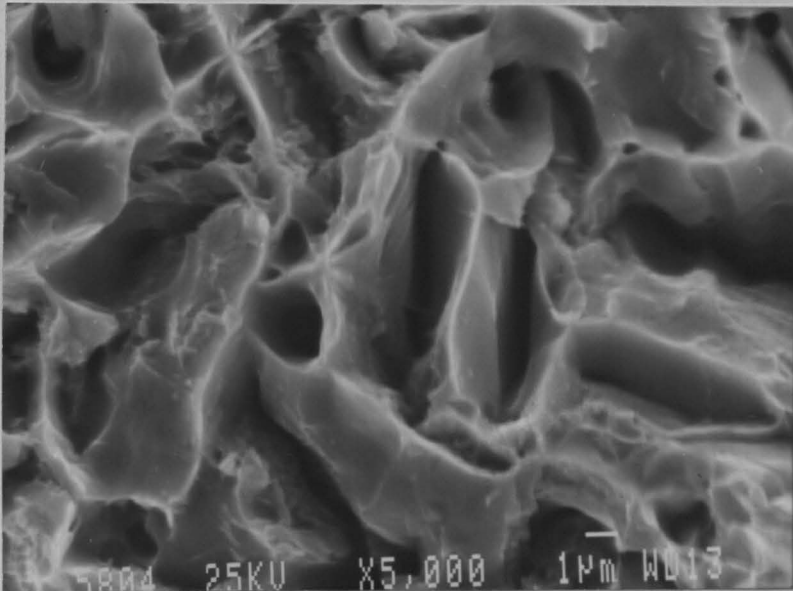
ANLAGE 5.29

Werkstoff.....: BSt 500 S - 20 Tempcore Probenmaterial B

Prüftemperatur...: - 180 °C

Probenbezeichnung: B 9.1

Brucheinschnürung: $Z_L = 56 \%$



Probenmitte

Wabenbruch

5000 : 1